

**RECHNERGESTÜTZTE  
METHODISCHE UNTERSUCHUNGEN  
MULTISPEKTRALER UND MULTITEMPORALER  
SATELLITENBILDDATEN (LANDSAT/HCMM)  
FÜR GEOLOGISCHE FRAGESTELLUNGEN  
AM BEISPIEL ANTI-ATLAS, MAROKKO**

**Inaugural-Dissertation**

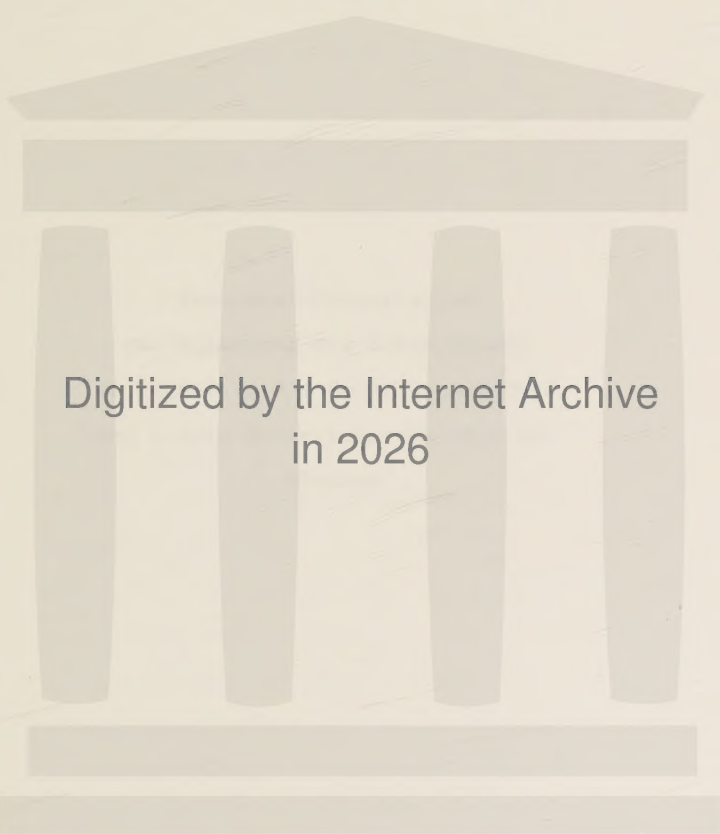
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Fakultät für Geowissenschaften  
der Ludwig-Maximilians-Universität  
München

vorgelegt von

**Hermann J. Kaufmann**

München, 1985





Digitized by the Internet Archive  
in 2026

[https://archive.org/details/IA41554609\\_0028](https://archive.org/details/IA41554609_0028)



RECHNERGESTÜTZTE METHODISCHE UNTERSUCHUNGEN MULTISPEKTRALER  
UND MULTITEMPORALER SATELLITENBILDDATEN (LANDSAT/HCM) FÜR  
GEOLOGISCHE FRAGESTELLUNGEN AM BEISPIEL ANTI-ATLAS, MAROKKO.

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Fakultät für Geowissenschaften  
der Ludwig-Maximilians-Universität  
München

vorgelegt von

Hermann J. Kaufmann

München, 1985

1. Berichterstatter:

Prof. Dr. J. Bodechtel

2. Berichterstatter:

Prof. Dr. H.-G. Gierloff-  
Emden

Tag der Einreichung:

21. Okt. 1985

Tag der mündlichen Prüfung:

10. Juli 1986

## INHALTSVERZEICHNIS

Seiten  
zahl

### ZUSAMMENFASSUNG

### EINLEITUNG

|    |                                     |   |
|----|-------------------------------------|---|
| 1. | Vorwort und Themenstellung          | 1 |
| 2. | Geographisch-geologischer Überblick | 2 |
| 3. | Datenauswahl                        | 4 |

### I. GRUNDLAGEN DER FERNERKUNDUNG

|    |                                                  |    |
|----|--------------------------------------------------|----|
| 1. | Physikalische Grundlagen                         | 6  |
| 2. | Aufnahmesysteme                                  | 10 |
| 3. | Einfluß der Atmosphäre                           | 16 |
| 4. | Prinzipien und Kriterien der Photointerpretation | 18 |

### II. DIGITALE BILDVERARBEITUNG

|          |                                                  |    |
|----------|--------------------------------------------------|----|
| 1.       | Bildstruktur                                     | 22 |
| 2.       | Vorverarbeitung der Bodenstation                 | 22 |
| 3.       | Korrekturverfahren                               | 23 |
| 3.1.     | Radiometrische Korrekturen der LANDSAT-MSS Daten | 23 |
| 3.1.1.   | Atmosphärische Korrekturen                       | 24 |
| 3.1.1.1. | Interaktiv-quantitative Methode                  | 24 |
| 3.1.1.2. | Regressionsmethode                               | 25 |
| 3.1.2.   | Korrektur der Beleuchtungsbedingungen            | 26 |
| 3.1.3.   | Diskussion                                       | 28 |
| 3.2.     | Radiometrische Konvertierung der HCMM-Daten      | 30 |
| 3.3.     | Geometrische Korrekturen                         | 32 |
| 3.4.     | Diskussion                                       | 33 |
| 4.       | Quantitative Datenerhebung                       | 35 |
| 4.1.     | Auswahl von Messfeldern und Profilen             | 35 |

# INHALTSVERZEICHNIS

|          |                                                                    |    |
|----------|--------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.     | Bildstatistik                                                      | 36 |
| 4.3.     | Konzept der thermalen Trägheit                                     | 36 |
| 4.4.     | Diskussion                                                         | 37 |
| 5.       | Datenoptimierungsverfahren                                         | 38 |
| 5.1.     | Einkanalige Verarbeitungen                                         | 38 |
| 5.1.1.   | Kontrastverstärkung                                                | 38 |
| 5.1.2.   | Kantenverstärkung (Filterverfahren)                                | 41 |
| 5.1.2.1. | Räumliche Filterung                                                | 41 |
| 5.1.2.2. | Richtungsbezogene Filterung                                        | 41 |
| 5.1.3.   | Diskussion (einkanaliger Verfahren)                                | 49 |
| 5.2.     | Mehrkanalige Verarbeitungen                                        | 54 |
| 5.2.1.   | Ratiotransformationen                                              | 54 |
| 5.2.2.   | Hauptachsentransformation                                          | 62 |
| 5.2.3.   | Diskussion (mehrkanaliger Verfahren)                               | 64 |
| 5.2.4.   | ATI und $\Delta T$ Berechnungen mit HCMR-Daten                     | 71 |
| 5.3.     | Farbtransformationen                                               | 71 |
| 5.3.1.   | Additive Falschfarbendarstellung (RGB)                             | 71 |
| 5.3.2.   | Transformationen nach Intensität, Farbfrequenz und Sättigung (IHS) | 73 |
| 5.3.3.   | Diskussion                                                         | 85 |
| 5.4.     | Natürliches - und synthetisches Stereo                             | 87 |
| 6.       | Kriterien für die Datenumsetzung auf photographisches Papier       | 91 |

## III. PHOTOGEOLOGISCHE AUSWERTUNG

|      |                                    |       |
|------|------------------------------------|-------|
| 1.   | Einführung                         | 93    |
| 2.   | Erstellung thematischer Karten     | 93    |
| 2.1. | Gewässernetz/Vegetationsverteilung | 93/95 |
| 2.2. | Lineamentkarte                     | 93/96 |
| 2.3. | Strukturkarte                      | 94/97 |
| 2.4. | Signaturkarte                      | 94/98 |

# INHALTSVERZEICHNIS

---

## IV. GELÄNDE-, LABOR- UND SPEKTRALE DATEN

|    |                                |     |
|----|--------------------------------|-----|
| 1. | Einführung                     | 99  |
| 2. | Stratigraphische Gliederung    | 101 |
| 3. | Tabellarische Zusammenstellung | 102 |

## V. DATENKORRELATION

|      |                                                  |     |
|------|--------------------------------------------------|-----|
| 1.   | Auflösung und Kontrast                           | 121 |
| 2.   | Albedo und spektrale Signifikanz                 | 122 |
| 3.   | Spektrale Signatur, Lithologie und Stratigraphie | 123 |
| 4.   | Diskussion von Einflußparametern                 | 124 |
| 5.   | Multitemporale Aspekte                           | 129 |
| 5.1. | Beurteilung spektraler Signaturen von MSS        | 129 |
| 5.2. | Beurteilung strukturgeologischer Inhalte von MSS | 131 |
| 5.3. | Beurteilung der Emissionsdaten des HCMR          | 135 |
| 6.   | Diskussion strukturgeologischer Einheiten        | 137 |
| 6.1. | Beurteilung der MSS Daten                        | 137 |
| 6.2. | Beurteilung der HCMR Daten                       | 138 |
| 7.   | Diskussion lithologischer Einheiten              | 139 |
| 7.1. | Beurteilung der MSS Daten                        | 139 |
| 7.2. | Beurteilung der HCMR-Daten                       | 140 |

## VI. SENSOREN DER 2. GENERATION

|    |                                                     |     |
|----|-----------------------------------------------------|-----|
| 1. | LANDSAT-Thematic Mapper (TM)                        | 143 |
| 2. | Modular Optoelectronic Multispectral Scanner (MOMS) | 152 |
| 3. | Optimierungen für zukünftige Sensoren               | 156 |

## VII. ABKÜRZUNGEN

## VIII. LITERATURVERZEICHNIS

## IX. DANKSAGUNG

## X. LEBENSLAUF

## ZUSAMMENFASSUNG

### Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der methodischen Verarbeitung und Auswertung von digital aufgezeichnetem Satellitenbildmaterial aus unterschiedlichen Wellenlängenbereichen. Die Untersuchungen wurden am Beispiel eines ariden Klimabereichs (Marokko/Anti-Atlas) im Rahmen eines Forschungsprogrammes der NASA (Heat Capacity Mapping Mission) unter Leitung von Dr. R. Haydn durchgeführt. Zur Verfügung stand multitemporales Datenmaterial aus dem reflektiven und thermalen Bereich des elektromagnetischen Spektrums.

Neben den Grundlagen der Fernerkundung, insbesondere den Sensorcharakteristiken ist die digitale Datenverarbeitung für die Auswertung und Interpretation von wesentlicher Bedeutung. Um dem Interpreten den, in den Rohdaten bereits vorhandenen Informationsgehalt voll zugänglich machen zu können, werden am Beispiel eines geeigneten Szenenausschnitts radiometrische und geometrische Korrekturverfahren sowie eine Reihe anwendungsbezogener Algorithmen eingesetzt.

Die digitale Datenverarbeitung gliedert sich in ein- und mehrkanalige Transformationen, die einzeln oder in Kombination zur Hervorhebung struktureller und/oder spektraler Bildinhalte genutzt werden. Für die synoptische Darstellung der Informationen eines Sensors bzw. von Multisensordaten werden verschiedene Konzepte zur farblichen Verknüpfung vorgestellt. In diesem Zusammenhang werden Algorithmen, die zu vergleichbaren Ergebnissen führen, auf ihre Vor- und Nachteile, die Wahl der Verarbeitungsparameter und ihre allgemein gültige Anwendung und Übertragbarkeit überprüft und diskutiert.

Die mit Hilfe der Datenverarbeitung verdeutlichten, vorwiegend lithologischen und strukturgeologischen Elemente, wurden anschließend, geordnet nach ihrer Thematik, in Karten übertragen. Diese dienten als Basis für die punktuelle Beprobung im Gelände.

Die Datenkorrelation wird eingeleitet mit einer theoretischen Betrachtung von Bildinhalten und ihrem Bezug zum Gelände, gefolgt von einer Diskussion unterschiedlicher Einflußparameter und multitemporaler Aspekte. Die Korrelation der Geländeelemente mit ihrer Erscheinung im Satellitenbild zeigt die Möglichkeiten und Grenzen der Satellitenfernerkundung und erörtert die Problematik der Konzeptentwicklung für den geologisch orientierten Anwendungsbereich.

Im Ausblick werden Sensoren der zweiten Generation mit ihren technischen Neuerungen und den daraus resultierenden, verbesserten geometrischen und radiometrischen Abbildungseigenschaften vorgestellt und ableitbare neue Anwendungsbereiche sowie die Übertragbarkeit der entwickelten Konzepte demonstriert.

Die Datensätze der Sensoren aus dem "optischen" und thermalen Wellenlängenbereich liefern völlig verschiedene Informationen, die zur Differenzierung unterschiedlicher Gesteinskörper und zur Erfassung von Strukturelementen genutzt werden können. Ein

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Rückschluß auf Mineralkomponenten ist nur in Ausnahmefällen möglich. Die Konzeptentwicklung orientiert sich bei der Bildverarbeitung nach strukturellen und spektralen Gesichtspunkten, wobei für den gezielten Einsatz über die Korrelationsrechnung, quantitative Erhebungen oder Zusatzinformationen spezielle, an der Aufgabenstellung orientierte Optimierungen durchgeführt werden können. Bestimmte Konzepte sind auf Nachbarbereiche mit vergleichbaren Oberflächen übertragbar.

Für geologisch bzw. klimatisch unterschiedliche Regionen sind nur die Konzeptionen der Verarbeitungsmethoden übertragbar. Die Wahl der Daten, Spektralbereiche, und Verarbeitungsparameter muß für unterschiedliche Regionen und in Abhängigkeit der Aufgabenstellung stets neu erarbeitet und definiert werden.



## 1. Vorwort und Themenstellung

In den letzten Jahren haben nichtphotographische Fernerkundungsverfahren wesentlich an Bedeutung zugenommen. Methodische und wissenschaftliche Untersuchungen überwiegend auf der Basis satellitengetragener Systeme haben gezeigt, daß die Fernerkundung entscheidende Beiträge zur Lösung unterschiedlicher Problemstellungen liefern kann. Der synoptischen Betrachtungsweise großflächiger Areale zum Verständnis überregionaler Zusammenhänge kommt dabei eine ebenso große Bedeutung zu, wie der durch Repetitionsraten ermöglichten Erfassung dynamischer Prozesse.

Die heutige Generation von Weltraumsensoren beruht neben wenigen photographischen Kameras zum großen Teil auf scannenden Aufnahmesystemen, die die von der Erdoberfläche remittierte elektromagnetische Strahlungsenergie synchron in mehreren, eng definierten Wellenlängenbereichen aufzeichnen. Die zur Verfügung stehenden Bilddaten liegen in digitaler Form auf Magnetbändern gespeichert vor.

Für die Nutzung dieser, in der räumlichen Auflösung und in der spektralen Auslegung und Auflösung zum Teil völlig verschiedenen Datensätze sind digitale Verarbeitungs- und Auswerteverfahren von grundlegender Bedeutung. Neben geometrischen und radiometrischen Korrekturverfahren stehen anwendungsorientierte Verarbeitungen zur Verdeutlichung der spektralen und strukturellen Bildinhalte im Vordergrund. Hier lassen sich zwei unterschiedliche Zielbereiche definieren.

- Methoden der automatischen Klassifikation
- Methoden der anwendungsorientierten Bildverbesserung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit den Methoden der Bildoptimierung und den damit verbundenen Möglichkeiten und Grenzen der Satellitenfernerkundung für aride Klimabereiche in Abhängigkeit von der spektralen, räumlichen und zeitlichen Auflösung. Es werden multitemporale Datensätze unterschiedlicher Sensoren aus dem sichtbaren-, dem nahen Infrarot- sowie aus dem thermalen Infrarot-Bereich vorgestellt, verarbeitet und diskutiert.

Als Testgebiet wurde eine Sektion des Anti-Atlas in Marokko aufgrund der geologischen Vielfalt und der nur spärlich vorhandenen bis gänzlich fehlenden Vegetation ausgewählt. Die, so für den Satellitensensor erfaßbaren Signaturen vielfältiger Gesteinsoberflächen, werden anhand der jeweils am besten geeigneten Bildprodukte nach herkömmlichen photogeologischen Kriterien ausgewertet und interpretiert. Die verarbeiteten Daten und die daraus erstellten thematischen Karten werden in der Folge genutzt, um Oberflächenphänomene und Lokalitäten mit ihrer Erscheinung auf den Satellitenbildern zu korrelieren und zu diskutieren.

Für die jeweilige Aufgabenstellung signifikante Spektralkanäle und deren Verarbeitungen werden dabei von redundanten Informationen getrennt und übertragbare Konzepte für die Verknüpfung auch unterschiedlicher Datenträger vorgestellt. Im Ausblick werden die, erst seit kurzem verfügbaren Daten neuer, hochauf-

lösender Sensoren, LANDSAT/THEMATIC MAPPER und MOMS im Vergleich mit den hier verarbeiteten diskutiert.

## 2. Geographisch-geologischer Überblick

Der Anti-Atlas ist nur dem Namen nach dem nordafrikanischen Atlas-Gebirgssystem zuzurechnen. Geologisch ist er bereits ein Teil des afrikanischen Kratons.

Er erstreckt sich vom Kap Nun an der Atlantikküste in ENE-Richtung bis zur Hammada du Guir. Im Norden wird er begrenzt durch eine Folge aneinandergereihter Becken und Senken (Souss, Ouarzazate), die zusammen die präafrikanische Furche bilden. Sie wird begleitet von einem komplexen Verwerfungsbündel, dem "accident sudatlasique", das zugleich die Trennungslinie zwischen dem tethyschen Hohen Atlas im Norden und dem afrikanischen Kraton und damit dem Anti-Atlas im Süden darstellt.

Die südliche Begrenzung wird vom Lauf des Oued Draa nachgezeichnet, der von seinem Ursprung im Becken von Ouarzazate den Anti-Atlas zuerst in SE-licher Richtung durchquert, um dann nach WSW in den Atlantik zu entwässern.

Das für die Untersuchungen ausgewählte Gebiet (Abb. 1) liegt am Ostrand des "Zentralen Anti-Atlas" südlich von Ouarzazate und reicht bis zu den Plaines du Draa im Süden. Die ältesten Gesteine treten in mehreren Aufbrüchen zutage (Zenega, El Graara, Jbel Tifernine), und können nach Choubert (1952) als Zonen der stärksten Aufwölbung des Untergrunds aufgefaßt werden. Effusiva mehrerer präkambrischer Phasen mit unterschiedlicher Ausprägung wie Rhyolithe, Andesite, Ignimbrite und Tuffite, teilweise durchsetzt mit Dolerit- oder Rhyolithgängen, charakterisieren neben wenigen Graniten und Migmatiten im wesentlichen das auftretende Kristallin. Im Bereich El Graara (Bou Azzer District) werden Co, Ni und As abgebaut deren Vorkommen an Serpentinite gebunden ist. Durch eine Diskordanz getrennte, unterschiedliche Konglomerate an der zeitlichen Grenze zum Paläozoikum verweisen auf mehrphasige orogene Aktivitäten.

Ummantelt werden diese ältesten Gesteinseinheiten von mächtigen Sedimentabfolgen infrakambrischen bis ordovizischen Alters. Es sind dies vor allem Wechselfolgen von Dolomit, Ton-Siltsteinen, Sandsteinen und Quarziten, mit zum Teil leicht metamorphem Charakter. Durch die variscische Orogenese wurden diese Sedimentserien gefaltet und das Gebiet des Anti-Atlas kratonisiert. Im Zuge der alpidischen Orogenese kam es zu Hebungen, die eine starke Bruchtektonik zur Folge hatten, wobei auch variscisch angelegte Trennflächen reaktiviert worden sind.

Die Anlage der Falten erfolgt dabei bevorzugt in drei Richtungen (Choubert 1952, 1963).

- Atlassische Richtung  
WSW-ENE bzw. E-W  
sie bestimmt das Streichen der Faltenzüge und Schichtkammlandschaften



Abb. 1: Testgebiet Marokko/Anti-Atlas südlich von Quarzazate.  
(Kreuzsignaturen = Kristallin; unterbrochene Linie =  
generalisierte morphologische Strukturen)

- Mesetienne Richtung  
S-N bzw. SSW-NNE  
sie prägt vorwiegend den westlichen Anti-Atlas.
- Ougartische Richtung  
NW-SE bzw. WNW-ESE  
sie tritt gegen Osten immer stärker in den Vordergrund.

### 3. Datenauswahl

Um eine möglichst umfangreiche Basis für eine quantitative und qualitative Satellitenbilddauswertung zu schaffen, wurden Daten des LANDSAT Multispektral Scanners (MSS) aus dem sichtbaren und dem nahen Infrarot Bereich sowie Aufzeichnungen eines Thermalscanners HCMR (Heat Capacity Mapping Radiometer) verwendet.

Mit Hilfe von Computerausdrucken der Bodenstation ESRIN in Frascati/Italien, die über alle wichtigen Bildparameter wie Koordinaten (Path und Row/Zentralkoordinaten), Aufnahmedatum, Sonnenstand, Bildqualität und Wolkenbedeckung informiert, wurden je zwei überlappende Szenen des 4kanaligen MSS aus zwei unterschiedlichen Jahreszeiten ausgewählt.

Die Thermaldaten wurden im Rahmen des Forschungsprogrammes mit der NASA direkt von der Bodenstation in Lannion/Frankreich, übermittelt. Das Bandmaterial enthielt dabei in der Regel eine Nacht-Infrarot Aufnahme oder eine Tag-Infrarotaufnahme mit einer synchronen panchromatischen Aufzeichnung aus dem "sichtbaren" Bereich.

Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den Aufnahmedaten und Indizes des zur Auswertung herangezogenen digitalen Bildmaterials.

Zur Unterstützung der Geländekorrelation stand folgendes Kartenmaterial zur Verfügung:

Carte Géologique du Maroc  
Ministère de l'Energie et des Mines,  
Direction de la Géologie, No. 70, 1957, 1978.  
Blatt Marakech, Maßstab 1 : 500 000  
Blatt Ouarzazate, Maßstab 1 : 500 000

Carte Géologique de l'Anti-Atlas Central  
et de la Zone Synclinale de Ouarzazate.  
Direction des Mines et de la Géologie  
No. 138, 1970, Maßstab 1 : 200 000

Alle Koordinaten sind in Neugrad (Gon) angegeben und beziehen sich auf 0-Meridian Paris.

HCMM Thermalscanner

LANDSAT-MSS

| MON. | Tag-Aufzeichnung            | Nacht-Aufzeichnung       |                                |
|------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| -    | - - - - -                   | - - - - -                |                                |
| 5 M  | 18.05./A0022-1419-1/2 (h)   | 26.05./A0030-02420-3 (a) |                                |
| -    |                             | 31.05./A0035-02350-3 (b) |                                |
| 6 J  |                             | 16.06./A0051-02340-3 (c) |                                |
| -    |                             |                          |                                |
| 7 J  |                             | 13.07./A0078-02360-3 (d) | 12.07./216-39<br>13.07./217-39 |
| -    |                             |                          |                                |
| 8 A  |                             |                          |                                |
| -    |                             |                          |                                |
| 9 S  | 06.09./A0133-13460-1/2 (i)  | 25.09./A0152-02130-3 (e) |                                |
| -    |                             |                          |                                |
| 10 Ø | 08.10./A0165-13430-1/2 (k)  |                          |                                |
| -    |                             |                          |                                |
| 11 N |                             | 13.11./A0201-02210-3 (f) | 15.11./216-39<br>16.11./217-39 |
|      | -30.11./A0218-13290-1/2 (l) |                          |                                |
| 12 D |                             |                          |                                |
| 78   |                             |                          | 78                             |
| 79   |                             |                          | 79                             |
| 1 J  | 12.01./A0261-13280-1/2 (m)  |                          |                                |
| -    |                             |                          |                                |
| 2 F  | 24.02./A0304-13300-1/2 (n)  | 28.02./A0308-02150-3 (g) |                                |
| -    |                             |                          |                                |

Tab. 1: Aufnahmezeitpunkte, Indizes und jahreszeitliche Verteilung  
des ausgewerteten Datenmaterials von Mai 78 bis Februar 79.

I. Grundlagen der Fernerkundung

Eine sachdienliche Auswertung multispektraler und multitemporaler Satellitenbilddaten setzt grundlegende Kenntnisse über Art und Funktion der Aufnahmesysteme sowie die Prinzipien der Fernerkundung voraus. Im folgenden soll dieser Themenkreis kurz erörtert werden.

Als Literaturverweise seien genannt:

American Society of Photogrammetry (1960), Barret & Curtis (1978), Bartels & Angenheister (1969), Gierloff-Emden (1970), NASA (1976), NASA (1980), Quiel (1973), Reeves (1975), Sabins (1978), Short et al. (1976), Short (1982), Siegal & Gillespie (1980), Sørensen (1979), Gerthsen et al. (1969).

1. Physikalische Grundlagen

Remote Sensing oder Fernerkundung wird allgemein definiert als die Ermittlung von Informationen über ein Objekt, ohne mit diesem in Berührung zu kommen.

Flugzeuge und Satelliten sind herkömmliche Plattformen, von denen aus fernerkundliche Beobachtungen gemacht werden. Der Ausdruck Fernerkundung ist hier auf Methoden beschränkt, die elektromagnetische Energie zur Aufspürung und Messung von Zielpunktcharakteristika nutzen.

Elektromagnetische Energie wird allen Energieformen zugeschrieben, die sich in harmonischem Wellenmuster mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Die elektromagnetische Welle besteht aus zwei Schwingungen; aus der Schwingung des elektrischen Vektors und einer Schwingung des magnetischen Vektors, die stets aufeinander senkrecht und beide senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung stehen. Die elektromagnetische Welle ist eine Transversalwelle.

Das Wellenkonzept erklärt die Fortpflanzung der elektromagnetischen Energie; ihre Aufzeichnung beruht jedoch auf der Wechselwirkung mit Materie. Diese Interaktion ist auf Lichtkorpuskeln oder Photonen mit der Energie  $h \cdot \nu$  (Plancksches Wirkungsquantum  $\cdot$  Frequenz) zurückzuführen. Die elektromagnetische Energie hat sowohl Wellen- als auch Quantennatur (Dualismus Korpuskel-Welle), wobei die Energie von der Frequenz und die Intensität von der Anzahl auftreffender Photonen bestimmt wird.

Elektromagnetische Wellen können durch die Beziehung aus Geschwindigkeit  $c$ , Wellenlänge  $\lambda$  und Frequenz  $\nu$  beschrieben werden.

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Trifft elektromagnetische Energie auf Materie, so kommt es zu Wechselwirkungen, die von spezifischen Sensoren erfaßt und

aufgezeichnet werden können. Diese Wechselwirkungen zwischen Materie und Strahlungsenergie, wie Reflexion, Streuung, Absorption und Emission, bilden die Grundlage für den Einsatz von Fernerkundungsmethoden.

Nach dem Stephan Boltzmann'schen Gesetz

$$W = \sigma \cdot T^4 \quad \text{wobei } W = \text{Strahlungsdichte} \cdot \text{cm}^{-2}$$

$$= \text{Stephan Boltzmann Konstante}$$

$$5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$$

$$T = \text{Absolute Temperatur } ^\circ\text{K}$$

strahlt jeder Körper eine Energiemenge ab, die der vierten Potenz seiner absoluten Temperatur proportional ist. Das Maximum der Strahlungsenergie verschiebt sich dabei mit steigender Temperatur nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz

$$\lambda = A \cdot T^{-1} \quad \text{wobei } A = 2898 \text{ } \mu\text{m } ^\circ\text{K}$$

$$T = \text{Temperatur } ^\circ\text{K}$$

zu kürzeren Wellenlängen. Abb. 2 zeigt diese Beziehung unter Einschluß des umfassenden Planck'schen Strahlungsgesetzes

$$p(v, T) dv = \frac{4 \pi h v^3}{c^3} \frac{1}{e^{hv/kT} - 1} dv$$

wobei

- $h = \text{Plancksches Wirkungsquantum}$   
 $6.6262 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
- $c = \text{Lichtgeschwindigkeit}$
- $v = \text{Frequenz}$

für die Erde und die Sonne, schematisch dargestellt durch die Strahlung verschiedener Schwarzkörper von 200 °K bis 6000 °K. Ein Schwarzkörper ist ein hypothetischer idealer Strahler, der die gesamte einfallende Energie völlig absorbiert und wieder emittiert. In dem Maße, wie die gesamte emittierte Energie eines Objektes mit seiner Temperatur variiert, ändert sich auch die spektrale Verteilung dieser Energie.

Aus oben genannten Gesetzen ergibt sich, daß in jedem beliebigen Wellenlängenbereich mit steigender Temperatur die Strahlungslungsenergie ebenfalls zunimmt, daß also die Strahlungsenergie eines Objektes primär eine Funktion seiner Temperatur ist und somit die gemessene Strahlungsintensität einen direkten Rückschluß auf die Oberflächentemperatur eines Körpers ermöglicht.

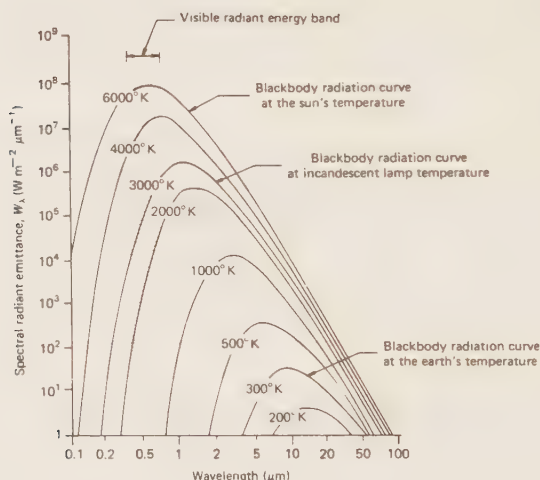


Abb. 2: Verschiebung des Strahlungsmaximums mit steigender Temperatur (Lillesand & Kiefer 1979).

Das Kirchhoff'sche Gesetz stellt die Beziehung zwischen einem idealen Strahler und der natürlichen Emission eines beliebigen Körpers her.

$$W_b = W * E \quad \text{mit } 1 \geq E \geq 0; \quad E = \text{Emissionskoeffizient}$$

Körper und Oberflächen mit einem Emissionskoeffizienten von 1 wären also perfekte Absorber bzw. Emittter, solche mit einem Koeffizienten von 0 perfekte Reflektoren.

In Abb. 3 ist die Beziehung zwischen der Wellenlänge und dem Betrag der von der Erdoberfläche reflektierten Sonnenstrahlung sowie der Eigenstrahlung der Erde dargestellt. Die reflektierte Strahlung der Sonne konzentriert sich auf den Bereich des sichtbaren Lichtes und des nahen Infrarots mit einem Maximum bei einer Wellenlänge von ca.  $0,5 \mu\text{m}$ .

Die von der Erde ausgesandte Eigenstrahlung verteilt sich auf ein breites, langwelliges Intervall, das Thermale Infrarot, mit einem Maximum bei  $9,7 \mu\text{m}$  Wellenlänge und ist auch nachts vorherrschend. Die Gesamtenergien der von der Erde reflektierten Sonnenstrahlung bzw. emittierten Wärmestrahlung unterscheiden sich größenordnungsmäßig um den Faktor 10, wobei die Energie eines einzelnen Photons nach der Gleichung  $E = h \cdot c / \lambda$  zur Wellenlänge umgekehrt proportional ist.

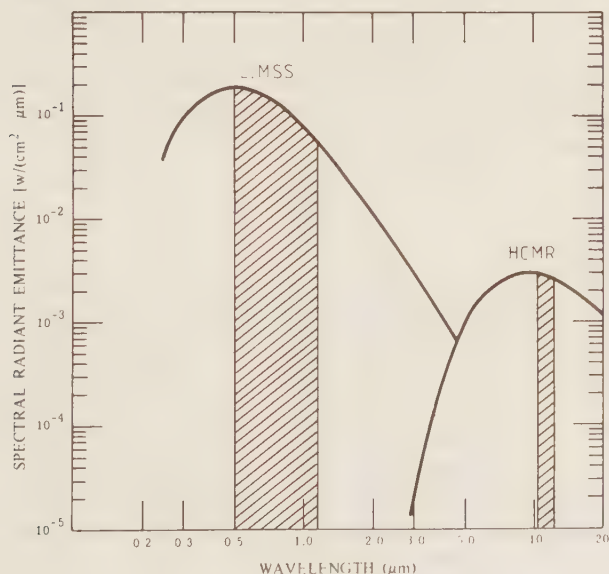


Abb.3: Für die Fernerkundung verfügbare Energie (aus Quiel, 1973). Die schraffierten Zonen umfassen die Empfindlichkeitsbereiche von LANDSAT-MSS und HCMR.

Die S t r a h l u n g s b i l a n z setzt sich aus einem kurzwelligen und einem langwelligen Anteil zusammen. Die kurzwellige Einstrahlung wird von der direkten Sonnenstrahlung und der gestreuten Himmelsstrahlung gebildet ( $2 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ ) und stellt die bei weitem wichtigste Energiequelle für alle, die Erdoberfläche kontrollierenden Prozesse, dar. Sonnenstand (Azimut, Elevation), Exposition und Klima bestimmen ihre Größe. Ein Teil dieser Einstrahlung wird reflektiert, wobei eine Reflexion von 3 - 40 % des einfallenden Lichtes für geologisch interessante Oberflächen charakteristisch ist. Der restliche Teil dieser Insolation wird von der Erdoberfläche absorbiert und steht damit für andere, wärmeverbrauchende Prozesse, wie Konvektion, Konduktion und langwellige Strahlung zur Verfügung.

Der langwellige Anteil der Strahlungsbilanz setzt sich aus der Eigenstrahlung der Erde, der Gegenstrahlung des Himmels und ihren vom Erdboden reflektierten Anteil zusammen.

Die Eigenwärme der Erde, zusammengesetzt aus der ursprünglichen Wärme durch Kontraktion der Gas- und Staubwolken bei der Entstehung, der radiogenen Wärme, der chemischen Reaktionen und der Saigerung des Eisens vom Mantel in den Erdkern, macht nur etwa  $1/10\,000$  gegenüber der eingestrahnten Energie aus und kann folglich für die Strahlungsbilanz vernachlässigt werden. Dasselbe gilt für die Einstrahlung aller Sterne ( $10^{-8} \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ ) und der des Mondes ( $2 \times 10^{-5} \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ ). (Bartels & Angenheister 1969).

## 2. Aufnahmesysteme

In der vorliegenden Arbeit wird digital auf CCT (Computer Compatible Tape) aufgezeichnetes Datenmaterial der Erdoberfläche aus dem Bereich der reflektierten Sonnenstrahlung und aus dem thermalen Infrarot verarbeitet und ausgewertet. Die Bild-daten vom reflektierten Anteil des Spektrums lieferte ein Satellit der LANDSAT-Serie (ERTS, Earth Resources Technology Satellite), die Daten aus dem emissiven Wellenlängenbereich wurden von einem Testsatelliten (HCMM, Heat Capacity Mapping Mission) zur Erde gefunkt. Beide, von der NASA ins Leben gerufene Satellitensysteme, sind u. a. mit sogenannten Multi-spektralscannern (Zeilenabtastern) ausgestattet, die mit passiven Sensoren die natürlich vorhandene, von der Erdoberfläche remittierte Strahlungsenergie registrieren.

Seit Juli 1972, mit dem Start des unbemannten Satelliten LANDSAT-1, liefern amerikanische Fernerkundungssatelliten unablässig Bilder über den aktuellen Stand der gesamten festen Erdoberfläche. Das zur Bearbeitung ausgewählte Datenmaterial wurde vom zweiten Vertreter dieser Serie (LANDSAT-2), ausgestattet mit gleichen technischen Merkmalen wie LANDSAT-1, zur Erde gefunkt.

Im Gegensatz dazu war HCMM die erste einer geplanten Reihe von anwendungsbezogenen Forschungsmissionen, die mit kleineren Satelliten auf definierten Umlaufbahnen das Bedürfnis nach speziellen Informationen erfüllen sollte. Mit HCMM wurde erstmals Material eines von der NASA konzipierten Satelliten mit thermalem IR-Sensor, für die zivile Forschung zur Verfügung gestellt. Er lieferte über die erwartete Lebensdauer von einem Jahr hinaus Daten bis September 1980 und ermöglichte damit Erdwissenschaftlern verschiedener Disziplinen, den Nutzen der im 12- oder 36-Stunden-Intervall aufgenommenen Thermaldaten für ihren Fachbereich zu untersuchen.

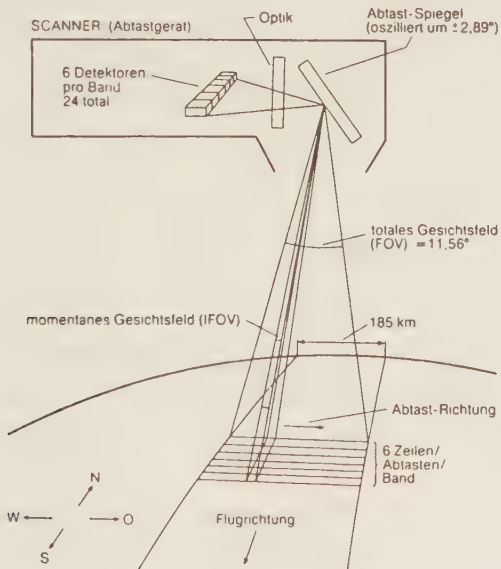


Abb. 4: LANDSAT Multispektralscanner (NASA, 1976)

Die sowohl bei LANDSAT als auch bei HCMM von einem oszillierenden Spiegel zeilenweise, senkrecht zur Flugrichtung akquirierte, panchromatische Information wird über einen Strahlungsteiler (nur MSS) spektral aufgespalten und den entsprechenden Detektoren zugeführt (Abb. 4). In diesen erzeugen die registrierten Reflexions- bzw. Emissionswerte jedes Bodenelements elektrische Ladungen, die in ihren Proportionen entsprechend der Strahlungsintensität variieren. Diese Analogsignale werden in digitale Form umgewandelt und einer 64- bzw. 256-stufigen Helligkeitsskala zugeordnet, wobei dem Wert 0 der optische Eindruck "schwarz" und dem Wert 63 bzw. 255 der optische Eindruck "weiß" zugeordnet wird.

| <u>PLATTFORM</u>           | <u>LANDSAT</u>                                                       | <u>HCMM</u>                                                      |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| STARTTERMIN                | 22. Januar 1975                                                      | 26. April 1978                                                   |
| ORBIT                      | 917 km Höhe nsyn.                                                    | 620 km Höhe nsyn.                                                |
| LOKALZEIT ü. ÄQUATOR       | 9.40 h                                                               | 14.00 h / 2.00 h                                                 |
| INKLINATION ÄQUATOR        | 99.10°                                                               | 97.80°                                                           |
| BREITENABDECKUNG           | 81° N - 81° S                                                        | 82° N - 82° S                                                    |
| REPETITIONSRATE            | 18 Tage                                                              | 16 Tage                                                          |
| UMLÄUFE/TAG                | 14                                                                   | 15                                                               |
| <br><u>Sensor</u>          | <br><u>MSS</u>                                                       | <br><u>HCMM</u>                                                  |
| ABTASTBREITE               | 185 km                                                               | 716 km                                                           |
| ABTASTWINKEL               | 11.56°                                                               | 60°                                                              |
| WINKELAUFLÖSUNG IFOV       | 0.064 millirad                                                       | 0.83 millirad                                                    |
| BODENPIXELGRÖSSE           | 79 x 79 m <sup>2</sup>                                               | thermal 600x600 m <sup>2</sup><br>visible 500x500 m <sup>2</sup> |
| SZENENGRÖSSE in PIXEL      | 2286 ROW 3200 COL                                                    | 1440 ROW 1996 COL                                                |
| ANZAHL der KANÄLE          | 4                                                                    | 2                                                                |
| SPEKTRALBEREICHE           | B4: 0.5-0.6 µm<br>B5: 0.6-0.7 µm<br>B6: 0.7-0.8 µm<br>B7: 0.8-1.1 µm | ther: 10.5-12.5 µm<br>vis : 0.5- 1.1 µm                          |
| DYNAMIKBEREICH<br>AUFNAHME | 6-bit/Band<br>64 Graust.                                             | 8-bit/Band<br>256 Graust.                                        |
| CCT                        | 8-bit                                                                | 8-bit                                                            |

Tabelle 2. Bahn- und Sensorparameter von LANDSAT-2 und HCMM

Diese Information wird entweder direkt (real time) zur Erde übermittelt oder von einem Bandrecorder zwischengespeichert (nur LANDSAT) und später im Empfangsbereich einer Bodenstation zur Erde gesendet. Über ein Referenznetz (Path/Row) können die Daten von dort bezogen werden. Tabelle 2 gibt einen Überblick zu den wichtigsten Bahn- und Sensorparametern der beiden Satellitensysteme. Ergänzend wäre dazu folgendes anzumerken:

Die LANDSAT-Plattform ist zudem mit einem RBV-System (Return Beam Videcon) und einem Thermalband (ab LANDSAT-3 10,5-12,5  $\mu\text{m}$ ) bestückt. Die RBV-Kamera liefert im Gegensatz zu den Zylinderprojektionen der MSS-Systeme zentralperspektivische Bilder. Sie wurden zur Auswertung nicht herangezogen, da aufgrund eines technischen Defekts nur panchromatisch aufgezeichnet worden war. Der im gleichen Bereich wie HCMR arbeitende Thermalkanal von LANDSAT-3, mit einer verbesserten räumlichen Auflösung von  $237 \times 237 \text{ m}^2$ , mußte ebenfalls aufgrund technischer Mängel außer Funktion gesetzt werden.

Zum anderen ist bei Vergleich der Ortszeiten über dem Äquator ersichtlich, daß die LANDSAT-Passagen um ca. 9.40 Uhr erfolgen, und so mitten in der vormittäglichen Aufheizphase liegen, während HCMR jeweils um 2.00 Uhr Ortszeit von Norden nach Süden und um 14.00 Uhr Ortszeit von Süden nach Norden den Äquator überquert. Damit ergeben sich für mittlere nördliche Breiten (30°) Aufnahmezeiten von 1.40 h und 14.20 h, wenn die Temperaturvariation ca. ihr Maximum erreicht hat. Auf dieser Tatsache, unter Einbeziehung des zusätzlich vom HCMR detektierten optischen Bereiches von 0,5 - 1,1  $\mu\text{m}$ , beruht auch das von den NASA-Wissenschaftlern favorisierte Konzept der thermalen Trägheit (Inertia) als wesentliches Anwendungsprinzip der HCMR.

Folgende Abbildungen, 5 a, b, zeigen die Bahncharakteristiken von LANDSAT und HCMR im Vergleich.

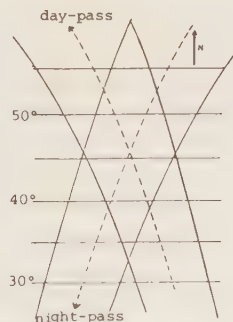
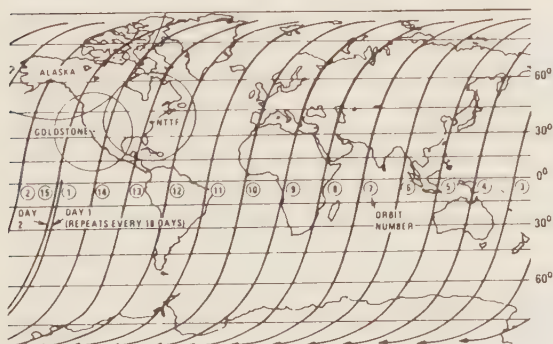


Abb. 5a: LANDSAT, NASA (1976)

Abb. 5b: HCMR, NASA (1980)

In den letzten Jahren ist die Entwicklung neuer Sensoren mit höherer geometrischer und radiometrischer Auflösung sowie verbesserter Technologien auf internationaler Ebene stark vorangetrieben worden. Aus der Vielzahl an Neuerungen werden zwei, seit kurzem im "optischen" Bereich digital akquirierende Systeme vorgestellt.

### LANDSAT-Thematic Mapper (TM)

Die LANDSAT Plattform der NASA wurde zusätzlich mit einem neuen System, dem sogenannten THEMATIC MAPPER (TM) bestückt. Er zeichnet synchron zu MSS die Erdoberfläche in 7 Spektralbereichen, bei einer Bodenpixelgröße von  $30 \times 30 \text{ m}^2$  mit Ausnahme des Thermalkanals ( $120 \times 120 \text{ m}^2$ ) auf (Tab. 3).

|        |                                     |                       |                          |
|--------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Band 1 | $0.45 - 0.52 \text{ }\mu\text{m}$   | blau.                 |                          |
| Band 2 | $0.52 - 0.60 \text{ }\mu\text{m}$   | grün                  | sichtbarer Bereich (VIS) |
| Band 3 | $0.63 - 0.69 \text{ }\mu\text{m}$   | rot.                  |                          |
| Band 4 | $0.76 - 0.90 \text{ }\mu\text{m}$   | nahes Infrarot        | (NIR)                    |
| Band 5 | $1.55 - 1.75 \text{ }\mu\text{m}$   | kurzwelliges Infrarot | (SWIR)                   |
| Band 7 | $2.08 - 2.35 \text{ }\mu\text{m}$   | kurzwelliges Infrarot | (SWIR)                   |
| Band 6 | $10.40 - 12.50 \text{ }\mu\text{m}$ | thermales Infrarot    | (TIR)                    |

Tab. 3: Spektralbereiche von LANDSAT - THEMATIC MAPPER  
(NASA, 1976; ergänzte Edition)

Die Abtastung erfolgt wie bei MSS über einen oszillierenden Spiegel, wobei TM in beiden Richtungen mit 16 Detektoren pro Kanal parallel aufzeichnet. Damit entfällt der, bei MSS notwendige Skalierungsvorgang. Die entscheidende Neuerung neben der verbesserten Bodenauflösung und der Einbeziehung des sichtbaren, blauen Spektralbereichs, besteht in der Aufzeichnung des kurzwelligen Infrarots (short wave IR / SWIR). Die Ausnutzung dieser verbliebenen atmosphärischen Fenster erlaubt den Zugriff auf Reflexionsdaten, die weder mit dem menschlichen Auge noch mit photographischen Emulsionen erfaßt werden können.

### Modular Optoelectronic Multispektral Scanner (MOMS)

MOMS-01 ist ein zweikanaliger CCD-Sensor mit einer Bodenauflösung von  $20 \times 20 \text{ m}^2$ , dessen erste Weltraumerprobung auf den Shuttlemissionen STS-7 und STS-11 im Juni 83 und Februar 84 stattfand. Er wurde, ebenso wie seine Trägerplattform SPAS (Shuttle Pallet Satellite), von Messerschmitt-Bölkow-Blohm

(MBB) unter Vertrag der DFVLR, nach den Vorschlägen von Prof. Dr. J. Bodechtel, an der Universität München, entwickelt.

Wie der Name bereits verrät, ist dieser Sensor mit einigen technischen Neuerungen ausgestattet. Der modulare Aufbau gewährleistet hohe Flexibilität und eine schnelle Anpassung an unterschiedliche Anforderungen. Aufgrund des optoelektronischen Konzepts kann auf mechanisch bewegte Teile und Strahlungsteiler, wie sie bei MSS und TM Verwendung finden verzichtet werden, wodurch eine maximale Energie (Licht) Ausbeute erreicht wird. Die Aufzeichnung erfolgt über eine Doppeloptik nach dem "Push-broom" Scan Prinzip. Dabei wird die Erdoberfläche quer zur Flugrichtung mit vier in Reihe angeordneten CCD-Arrays (Charged Coupled Device) simultan abgetastet. Jeder dieser CCD's trägt 1728 strahlungsempfindliche Elemente, so daß eine Bildzeile bei MOMS aus 6912 Elementen aufgebaut ist.

Um geometrisch möglichst exakte Abbildungen zu erhalten, wurde die Scanrate an die Bahngeschwindigkeit des Shuttle angepaßt. Einzelne technische Details sind u.a. dargestellt in Bodechtel et al. (1983), Meissner (1982), MOMS-01 (1984).

Die erste Weltraumversion von MOMS war ausgerüstet mit einem schmal- und einem breitbandigen Kanal im sichtbaren und im nahen IR Bereich (Abb. 6). Eine spektrale Neuerung ist nur in sofern gegeben, daß der sichtbare Kanal im orangen Bereich des Spektrums, also zwischen die MSS-Kanäle 4 und 5 gelegt worden ist. Die Aufzeichnung beider MOMS-Kanäle erfolgt bei variablen Grenzen, mit einer Dynamik von 7-bit (128 Graustufen).

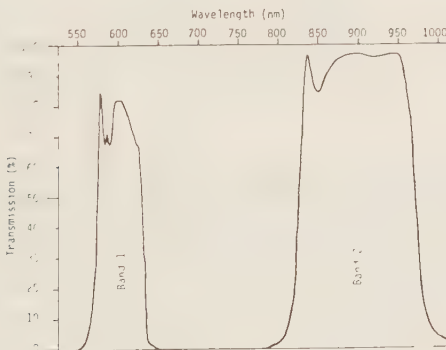


Abb. 6: Spektralkanäle von MOMS-01 (MOMS-01, 1984)

Für zukünftige Missionen sind weitere Module im sichtbaren und SWIR Bereich geplant. Der Bau eines Stereo-MOMS wurde bereits in Angriff genommen.

### 3. Einfluß der Atmosphäre

Die oberflächenspezifischen Strahlungsintensitäten in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen werden durch verschiedene Faktoren beeinflusst; durch die Beschaffenheit des zu messenden Objektes, durch das Sensorsystem selbst und durch unterschiedliche Störstrahlen (Rauschen). Am gewichtigsten ist jedoch die Beeinflussung durch die Atmosphäre. Sie trennt den Sensor von den aufzunehmenden Objekten an der Erdoberfläche.

Beim Signaltransfer wird die elektromagnetische Strahlung modifiziert, wobei für die Fernerkundung im wesentlichen die unteren 10 km der Atmosphäre von Bedeutung sind. Hier ist eine Einschränkung gegeben durch die atmosphärischen Fenster, welche die Transmission auf bestimmte Spektralbereiche begrenzen. Wie aus Abb. 7 zu ersehen ist, bleibt auch außerhalb der sogenannten atmosphärischen Absorptionsbanden ein restlicher Prozentanteil an Gasen und Aerosolen, die das vom Sensor empfangene Signal unterschiedlich, in Abhängigkeit von der Wellenlänge, beeinflussen.

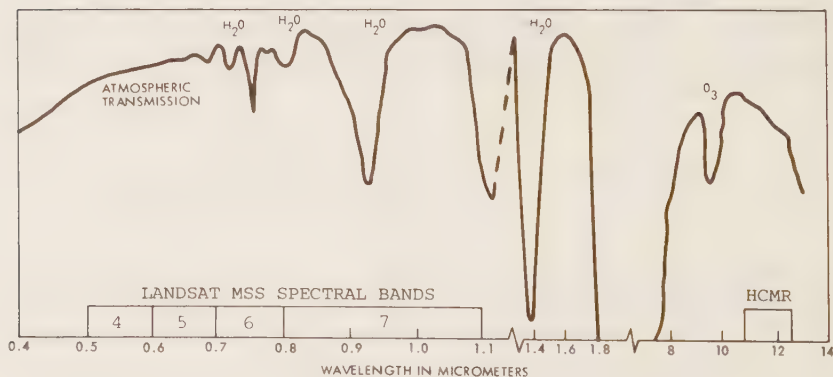


Abb. 7: Atmosphärische Transmission in Abhängigkeit von der Wellenlänge. modifiziert nach (NASA, 1976)

Dabei wird deutlich, daß die Strahlung beim Transfer durch die Erdatmosphäre einer Vielzahl möglicher Prozesse unterliegt, wie Absorption, Streuung, Reflexion und Emission sowohl in Richtung auf die Erdoberfläche als auch in Richtung zum Sensor, wobei ein Teil verlorengehen, aber auch ein Teil dazuaddiert werden kann (Abb. 8).

Für die Wellenlängenbereiche des sichtbaren Lichts und des nahen Infrarots ( $0,5 - 1,1 \mu\text{m}$ ), also für die vom LANDSAT- MSS aufgezeichneten Daten nimmt die Streuung der Strahlung einen entscheidenden Einfluß. Es wird unterschieden zwischen selektiver und nicht selektiver Streuung.

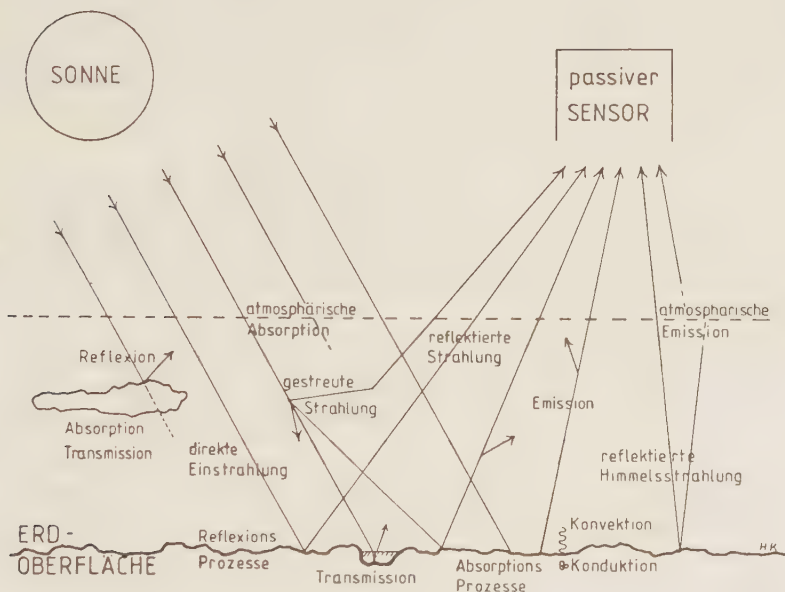


Abb. 8: Wechselbeziehung Strahlung-Atmosphäre

Rayleigh - und Mie-Streuung sind die zwei Prozesse der selektiven Streuung, die ihren Namen aufgrund ihres selektiven Einflusses auf unterschiedliche Wellenlängen haben. Zur Rayleigh - Streuung kommt es, wenn die Größe der Partikel verhältnismäßig klein zur Wellenlänge ist ( $r \ll \lambda$ ). Rayleigh-Streuung von Gas-Molekülen in der Atmosphäre findet überwiegend im sichtbaren Bereich des Spektrums statt, wobei die Streuintensität von der mittleren Polarisierbarkeit der Moleküle abhängt. Die Streuung des Sonnenlichts ist auf die im elektrischen Felde der Lichtwelle mitschwingenden Elektronen in den Molekülen der Atmosphäre zurückzuführen (erzwungene harmonische Schwingungen). Dabei ist die Intensität des Streulichts der 4. Potenz der Frequenz proportional. Das kurzwellige blaue Licht wird also viel stärker (um ca. den Faktor 10) gestreut als das langwelligere rote Licht (Himmelsblau). Die Hauptbestandteile der Atmosphäre  $\text{N}_2$  und  $\text{O}_2$

sind symmetrische, homonukleare, diatomische Moleküle ohne permanentes Dipolfeld, haben keine Vibrations- oder Rotationsmerkmale und sind sowohl für die sichtbare als auch infrarote Strahlung durchlässig (Kahle et al. 1981).

Mie-Streuung wird von Partikeln wie Rauch oder Dunst verursacht, die annähernd dieselbe Dimension haben wie die Wellenlänge des Lichts ( $r \approx \lambda$ ). Generell kann gesagt werden, daß Mie-Streuung sich umgekehrt proportional zur Wellenlänge ( $\lambda^{-1}$ ) verhält, und im Gegensatz zur Rayleigh-Streuung in der Regel nur vorwärts gerichtete Komponenten aufweist. In einer klaren Atmosphäre treten also Streueffekte auf, hervorgerufen durch eine Kombination selektiver Prozesse, die mit Hilfe digitaler Bildverarbeitungsmethoden quantifiziert und zum Teil eliminiert werden können (s. Kapitel Korrekturen).

Nicht beseitigt werden können Staub, Nebel und Wolken mit Partikelgrößen, welche die Wellenlänge des Lichts um mehr als das zehnfache übersteigen ( $r \gg \lambda$ ). Diese Partikel streuen alle Wellenlängen gleich (nicht selektive Streuung), so daß Wolken und Nebelfelder weiß erscheinen, obwohl ihre Wasserbestandteile farblos sind.

Die Streuung in den Wellenlängen des mittleren (thermalen) Infrarot ist auf Aerosole, wie Wassertröpfchen, Eis oder andere Partikel ähnlicher Größenordnung, zurückzuführen. Absorption und Emission in den Wellenlängen des mittleren Infrarot werden durch die selteneren polyatomaren Gase der Atmosphäre verursacht, vorwiegend durch  $H_2O$ ,  $CO_2$  und  $O_3$ . Obwohl der Bereich von 10,5 nach 12,5  $\mu m$  (HCMM) ein gutes atmosphärisches Fenster darstellt, ist auch hier eine signifikante Absorption und Emission, überwiegend verursacht durch  $H_2O$ , festzustellen. Unglücklicherweise ist der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre sehr variabel und die Strahlungseffekte extrem sensibel gegenüber diesen Schwankungen, sogar wesentlich sensibler als gegenüber den Temperaturunterschieden der Atmosphäre.

#### 4. Prinzipien und Kriterien der Photointerpretation

Die Techniken der Photointerpretation wurden bald nach Entdeckung des photographischen Prozesses entwickelt. Sie sind wohl etabliert und werden heute, außer auf die Produkte photographischer Verfahren, ebenso auf digital aufgezeichnetes und verarbeitetes Bildmaterial angewendet. Dabei muß von folgenden Prinzipien ausgegangen werden:

- Das vorliegende Datenmaterial repräsentiert eine bildliche "Momentaufnahme" (Abtastdauer für eine MSS-Szene ca. 24sec.) eines Musters einer bestimmten Landschaft.
- Das Muster ist zusammengesetzt aus Elementen, die als Indikatoren von Gegenständen und Ereignissen die physikalischen Merkmale einer Landschaft widerspiegeln.
- Ähnliche Zustände in ähnlicher Umgebung bei gleichen Bedingungen remittieren ähnliche Muster; ungleiche Zustände remittieren ungleiche Muster.

- Die Art, Menge und Qualität an Information die erlangt werden kann, ist proportional der Erfahrung, dem Hintergrundwissen und der Geschicklichkeit des Interpreten sowie der angewendeten Methode.

Zur Auswertung stehen dem Interpreten dabei eine Reihe von Kriterien zur Verfügung, die eine gezielte Ansprache unterschiedlicher Phänomene ermöglichen. Einen detaillierten Einblick zu diesem Thema geben u.a. American Society of Photogrammetry (1960), Kronberg (1984), Lillesand & Kiefer (1979), List (1978), Way (1978).

- Die **S i g n a t u r** ist das grundlegende Kriterium zur Differenzierung unterschiedlicher Oberflächen und wird in der S/W-Darstellung auf Photopapier oder am Monitor auch als Ton, Grauton, Helligkeit oder Intensität bezeichnet. Bei der Verarbeitung von Farbdarstellungen tritt an die Stelle des Grautons der Farbton, der durch seine drei Parameter Intensität, Farbfrequenz und Sättigung charakterisiert ist.
- Die **T e x t u r** ist das zweite grundlegende Interpretationskriterium und durch die Frequenz des Helligkeitswechsels sowie deren Anordnung ohne geometrische Einordnung bestimmt. Fein, grob, fleckig oder streifig sind Termini, die zu ihrer Beschreibung herangezogen werden.
- Das **M u s t e r**, auch Netz oder Pattern (engl.) genannt, bezieht sich auf die Verteilung von Hell und Dunkel in einem definierten Bereich bei dem zumindest die Geometrie der Verteilung klar anzusprechen ist. Sie ist gegenüber der Textur ein Gefüge höherer Ordnung, ein Arrangement der Anordnung. Kluftnetze, Gewässernetze etc. sind durch ihre erkennbare Geometrie charakterisiert.
- Die **L a g e b e z i e h u n g**, d. h. die Lokalität von unterschiedlichen Objekten bzw. deren Oberflächen zueinander ist ein weiteres wichtiges Kriterium zur Interpretation. Es ist einer der entscheidenden Vorteile kleinmaßstäbiger Aufnahmen, daß sie einen weiträumigen Überblick (Synopsis) vermitteln und damit Zusammenhänge deutlich werden, die z.B. im Gelände bei der Betrachtung isolierter Sachverhalte nicht oder nur ungenügend erfaßt werden können.
- Die **M o r p h o l o g i e** kann mit Hilfe stereoskopisch aufgezeichneter Daten direkt beobachtet werden. Bei monoskopischen Aufnahmen können über den **S c h a t t e n w u r f** und unter Einbeziehung vorgenannter Kriterien morphologische Formen abgeschätzt werden.

II. Digitale Bildverarbeitung

Bei der digitalen Bildverarbeitung werden die, im binären Code auf Magnetband gespeicherten Informationen im Rechner einer Reihe von Operationen unterzogen. Mit Hilfe unterschiedlicher Verfahren können dabei optimierte Bildvorlagen für die jeweilige Aufgabenstellung und die Anforderungen des Interpreten geschaffen werden.

Das menschliche Auge kann nur etwa 30 Graustufen unterscheiden und ist somit einer Differenzierung mit Rechnerunterstützung unterlegen. Die in den Rohdaten bereits vorhandene, nur für den Betrachter oft nicht wahrnehmbare Information wird mit dem Rechner verdeutlicht bzw. "sichtbar" gemacht. Die Analyse und Interpretation der Bildprodukte erfolgt interaktiv visuell am Monitor oder auf photographischem Material, das über einen Trommelplotter ausgegeben wird. Letzterer Prozess ist die Umkehrung des Scanvorganges bei der Aufzeichnung durch den Satellitensensor.

Die im folgenden diskutierten Bildverarbeitungsmethoden gliedern sich in Vorverarbeitungsverfahren (geometrische und radiometrische Korrekturen) und in eine eigentliche Verarbeitung ein- und mehrkanaliger Bilder.

Abb. 9 zeigt die Strukturierung der zur Verfügung stehenden Bildverarbeitungsanlage.

Sie besteht aus einer zentralen Recheneinheit, die mit Bandstationen, Plattenspeichern, einem Matrixdrucker und einem Filmausgabegerät verbunden ist. Über ein Terminal können die einzelnen Stationen sowie eine analoge Bildauswerteeinheit mit Farbmonitor angesprochen werden. Ein getrenntes Terminal steuert ein peripheres interaktives Bildverarbeitungssystem, das mit dem Zentralrechner in Verbindung steht und weitgehend unabhängig von diesem betrieben werden kann. Seine Funktionskomplexe sind hierarchisch in Menüebäumen aufgebaut, die nach Bedarf über ein Schaltpult aktiviert werden können. Mit Hilfe einer Rollkugel können Bildoptimierungen in "Echt-Zeit" durchgeführt und auf einen Farbmonitor übertragen werden, ohne die Originaldaten zu verändern. Die Speicherorganisation ist dabei so durchgeführt, daß den verschiedenen bit-Ebenen die Intensität, Farbfrequenz und Farbsättigung zugeordnet sind. Damit ergeben sich, im Gegensatz zu einer Änderung der Rot-, Grün-, Blauanteile, Möglichkeiten der Farbmodifikation einer bit-Ebene, ohne die anderen zu beeinflussen.

Dieser maßgebliche Vorgang, der über einen Display-Processor gesteuert wird und durch Speicherung der Transformationstabellen jederzeit reproduzierbar ist, eignet sich somit bestens für eine quantitative Datenauswertung. Weitere Unterschiede zum Zentralrechner bestehen in der geringeren Speicher- und Verarbeitungskapazität, die auf 512x512 Bildpunkte pro Szene beschränkt ist, in einer unterschiedlichen Software sowie einem veränderten Datenmanagement.

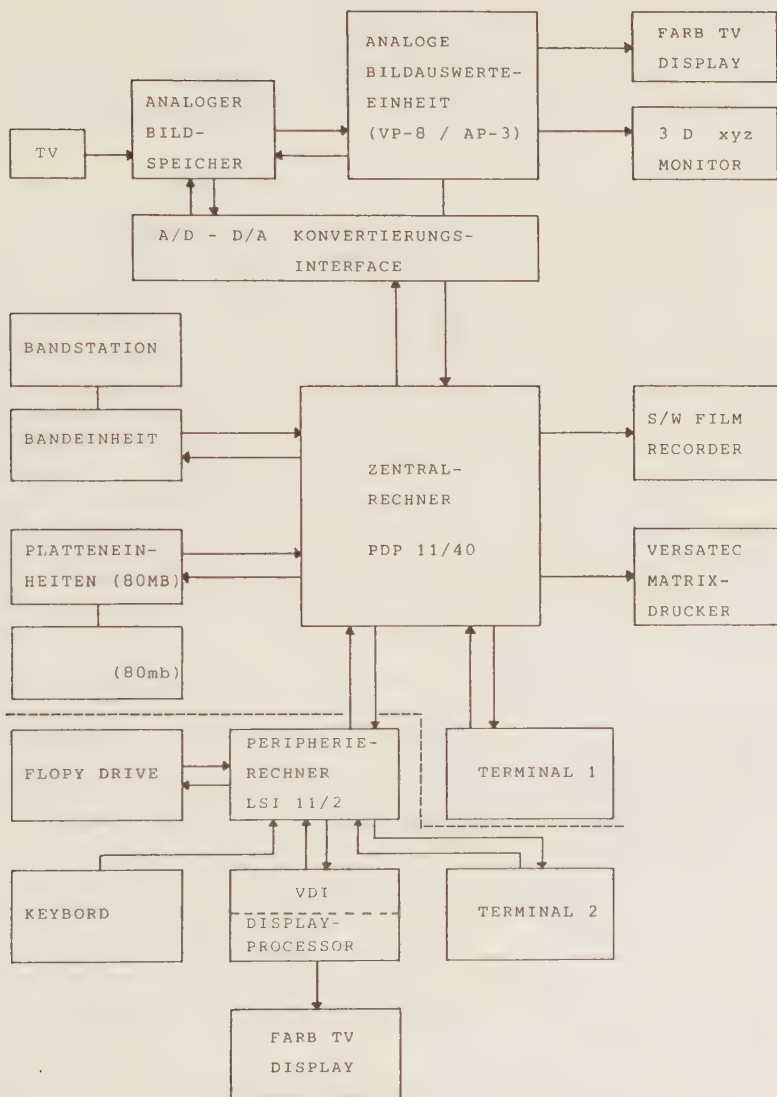


Abb. 9: Strukturierung der Bildverarbeitungsanlage  
(ZGF-Handbuch; Stand Jan. 1985)

Die folgende Diskussion verschiedener Verarbeitungsmethoden konzentriert sich auf die Prinzipien und Anwendungsmöglichkeiten der digitalen Bildverarbeitung. Die jeweiligen Produkte für eine quantitative und qualitative Auswertung wurden mit Hilfe der am Institut vorhandenen Hard- und Softwarepakete erstellt. Die mathematischen Grundlagen für die Bildverarbeitungsprozesse können u. a. bei Chavez (1975), Moik (1980), Pratt (1977) sowie Rosenfeld & Kak (1976) entnommen werden.

### 1. Bildstruktur

Die Bilder beider, scannender Sensoren (MSS und HCMR) bestehen aus einer Vielzahl kleiner Bildelemente oder Pixels, die in Linien (rows) und Spalten (columns) geordnet sind (Tab. 2). Jedes Pixel kann durch ein dreidimensionales Koordinatensystem numerisch beschrieben werden, wobei  $x$  und  $y$  die geometrische Lage jedes Elements zum Koordinatenursprung in der linken oberen Ecke fixieren, und der  $z$ -Wert die Intensität im Bereich einer festgelegten Grauskala angibt. Die Abtastfläche pro Pixel beträgt beim LANDSAT-MSS  $79 \times 79 \text{ m}^2$ , beim HCMR  $500 \times 500 \text{ m}^2$  bzw.  $600 \times 600 \text{ m}^2$ . Während das HCMR einen Detektor pro Spektralband zur Aufzeichnung verwendet, tastet der MSS von LANDSAT die Erdoberfläche mit 6 Detektoren pro Spektralband parallel ab. Die auftreffenden Signale beim MSS werden dabei in Scanrichtung um circa den Faktor 1,4 auf  $79 \times 56 \text{ m}^2$  gesampelt. Bedingt durch die Erdrotation, werden die aufeinanderfolgenden Zeilen während des Abtastvorganges in Abhängigkeit vom Breitengrad noch zusätzlich gegeneinander versetzt.

### 2. Vorverarbeitung der Bodenstation

Bei der Vorverarbeitung der vom MSS aufgezeichneten Rohvideodaten werden von der Bodenstation Fucino/Italien erste radiometrische und geometrische Korrekturen vorgenommen (European Space Agency, 1979).

Für die Daten der Kanäle 4, 5 und 6 wird ein Kompressionsmodus verwendet, da die entsprechenden Detektoren (Photomultiplier) ein besseres Verhältnis des Signals zum Rauschen aufweisen als die in Kanal 7 verwendeten Silicon-Photodioden. Durch Dekompression von 6-bit (64 Graustufen) auf 8-bit (256 Graustufen) wird eine Linearisierung der Daten (Kanal 4, 5, 6) erreicht und gleichzeitig eine evtl. Dekalibrierung der 6 parallel aufzeichnenden Detektoren ausgeglichen. Letzter Vorgang ist auf sogenannten "Look-up" Tabellen am Anfang jedes Magnetbandes zusammen mit weiteren Bildparametern gespeichert. Die zur Auswertung herangezogenen Datensätze vom Juli und November wurden über annähernd identische, radiometrische Tabellen transformiert.

Die Geometrie der systemkorrigierten Daten entspricht einer "Space Oblique Mercator Projection" (SOM), die dem UTM-Gitter angenähert ist. Auf diese Daten sind Korrekturen bezogen auf die Erdrotation und auf die Winkelgeschwindigkeit des Abtastspiegels bereits angewendet. Nicht korrigiert sind kurzfristige Lageveränderungen des Satelliten.

Die Qualität der zur Verarbeitung ausgewählten MSS-Daten kann als sehr gut bezeichnet werden.

Die Daten des HCMR wurden von der Bodenstation Lannion/Frankreich in vorkorrigiertem Zustand übermittelt. Die geometrischen Eigenschaften waren gut und entsprechen einer HOM-Projektion (Hotine-Oblique Mercator). Die radiometrische Qualität war z. T. weniger befriedigend. So ist ein Großteil des Materials mit sägezahnartigen nicht systematischen Fehlern behaftet.

### 3. Korrekturverfahren

Die Weiterverarbeitung und Auswertung der Daten verlangen zusätzliche geometrische und radiometrische Korrekturen. Der teilweise oder völlige Ausfall von Daten in einer oder mehreren Scanlinien kann durch Interpolation der Nachbarzeilen oder durch Duplikation einer der beiden aus rein optischen Erwägungen behoben werden. Eine "Striping" Korrektur (6 Scanlinien Effekt) bei MSS über Histogrammausgleich war aufgrund der guten Datenqualität bzw. Vorverarbeitung nicht nötig. Das in den Thermaldaten z. T. vorhandene Rauschen hatte keine quantifizierbare Charakteristik und konnte mit verfügbaren Programmen nicht behoben werden.

#### 3.1. Radiometrische Korrekturen der LANDSAT-MSS Daten

Wenn elektromagnetische Energie auf die Erdoberfläche auftrifft  $E_i(\lambda)$  kommt es zu drei fundamentalen Wechselwirkungen mit Materie. Unterschiedliche Anteile werden als Funktion der Wellenlänge reflektiert  $E_r(\lambda)$ , absorbiert  $E_a(\lambda)$ , und transmittiert  $E_t(\lambda)$ .

$$E_i(\lambda) = E_r(\lambda) + E_a(\lambda) + E_t(\lambda)$$

Die unterschiedliche Stärke der Reflexion in den Wellenlängen des sichtbaren Bereichs kann das menschliche Auge als Farben unterscheiden. Dies ist jedoch nur möglich bei diffusen Reflektoren, sogenannten Lambert'schen Oberflächen. Spiegelnde Reflektoren zeigen keine spektralen Informationen. Ein Körper reflektiert diffus, wenn die Wellenlänge der einfallenden Strahlungsenergie wesentlich geringer ist als die Höhenvariationen seiner Oberfläche (Lillesand & Kiefer, 1979). Geht man bei geologischen Oberflächen vom Lambert'schen Modell der Reflexion aus, so ergibt sich für die am Sensor empfangene Strahlungsleistung:

$$L(\lambda) = S * E(\lambda) \tau(\lambda) p(\lambda) / \pi + L_p(\lambda)$$

wobei  $S$  = Beleuchtungsfaktor ( $0 \leq S \leq 1$ )  
 $E(\lambda)$  = remittierte Strahlung an der Erdoberfläche  
 $\tau(\lambda)$  = Durchlässigkeit der Atmosphäre  
 $p(\lambda)$  = Remissionskoeffizient des Objektes  
 $L_p(\lambda)$  = Streustrahlung auf dem Weg durch die Atmosphäre

(aus Burger 1981 nach Thomson & Sadowski 1975).

### 3.1.1. Atmosphärische Korrekturen

Die Streustrahlung  $L_p(\lambda)$  ist für kurzwelliges Licht erheblich größer als für langwelliges Licht, d.h. sie ist am größten in Kanal 4 und kann erfahrungsgemäß in Kanal 7 vernachlässigt werden. Diese auch "Himmelslicht" genannte Streustrahlung addiert sich zu den Reflexionswerten der Erdoberfläche und verursacht eine Kontrastminderung. Sie macht sich zudem bei Ratiobildungen (Verhältnissbilder Kap.II.5.2.1) störend bemerkbar, und muß für die Kanäle 4, 5 und 6 quantitativ erfaßt (Kap. II.4) und durch Subtraktion von jedem Bildpunkt einer Szene eliminiert werden. Neben zum Teil sehr aufwendigen Verfahren, für die zudem Bodenreferenzmessungen in "Echtzeit" erforderlich sind, bieten sich nach Chavez (1975) folgende, unkomplizierte und dennoch wirkungsvolle Möglichkeiten zur Korrektur an:

#### 3.1.1.1. Interaktiv-quantitative Methode

Die verwendeten Korrekturmethoden nutzen die Tatsache, daß Kanal 7 ( $0,8 - 1,1 \mu m$ ) annähernd frei von der Überlagerung atmosphärischer Streueffekte ist. Innerhalb starker Schlag Schatten bilden sich somit Bildpunkte mit den Werten 0 oder 1 ab. Ebenso zeigen saubere Wasserflächen aufgrund der völligen Absorption keine Reflexion in Kanal 7. Betrachtet man die korrespondierenden Bildpunkte der restlichen 3 Kanäle (4, 5, 6) so ist ein Anstieg der Grauwerte zum kurzwelligen Bereich erkennbar. Diese Werte repräsentieren das individuelle Streulicht je Kanal. Abb. 10 a, b zeigen die Streulichtanteile für die Juli- und November-Aufzeichnungen, ermittelt am Stausee von Quarzazate und am Schattenwurf des Jbel Bani.

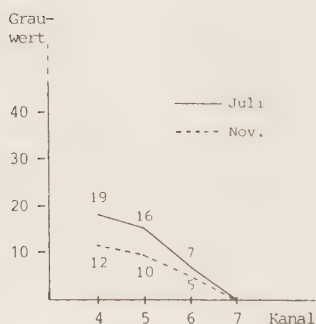


Abb. 10a: Streulicht über Schattenfläche

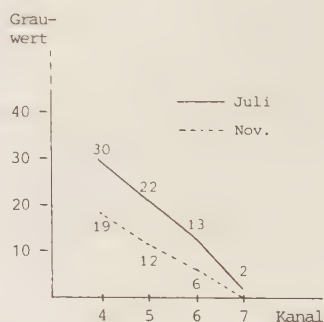


Abb. 10b: Streulicht über Wasserfläche

Die Streulichtanteile in nördlichen Breiten liegen im Juli aufgrund der veränderten Beleuchtungsverhältnisse erwartungsgemäß höher als im November. Die über der Wasserfläche ermittelten Werte zeigen generell einen Anstieg gegenüber den Wer-

ten aus den Schattenbereichen. Die Ursache hierfür findet sich im organischen und anorganischen Schwebstoffgehalt des Stausees, der durch seine Reflexion eine Überlagerung und damit "Erhöhung" der atmosphärischen Streulichtanteile bewirkt.

Wie die in Kap. II 5.2.1. durchgeführten Ratiobildungen verdeutlichen, liefern die Schattenmessungen brauchbare Ergebnisse für die Kanalkombinationen aus 5, 6 und 7. Ratiobilder aus Kombinationen die Kanal 4 einbeziehen, zeigen dagegen nach wie vor das Geländere relief. Dies ist darauf zurückzuführen, daß insbesondere kurzwelliges Licht in Schattenbereiche hineingestreut, und dort von den jeweiligen Oberflächen verschieden stark wieder reflektiert wird. Um dennoch die spektralen Signaturen unabhängig von den Beleuchtungsverhältnissen differenzieren zu können, muß der additive Wert für Kanal 4 höher angesetzt werden. Dabei ergibt sich für November der Wert 25, für Juli der Wert 33. Abb. 11 a + b zeigen je ein Ratio 4/7 desselben Bildausschnitts vom November, einmal nach Subtraktion des ermittelten atmosphärischen Streulichts, und einmal nach Subtraktion des erhöhten Anteils.

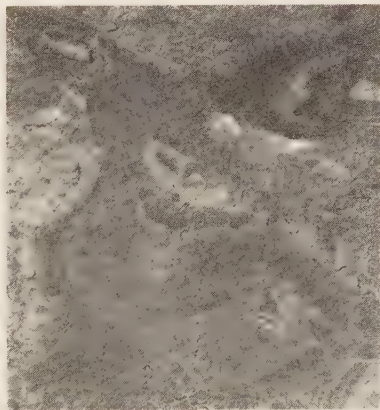
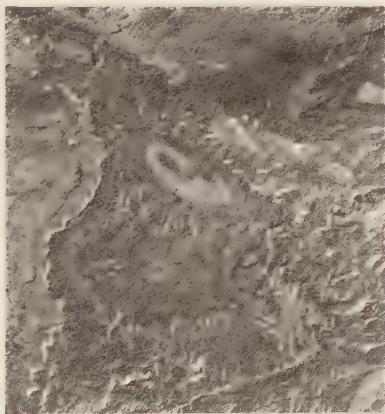


Abb. 11a: Ratio 4/7 ohne Streulichterhöhung in Kanal 4.

Abb. 11b: Ratio 4/7 mit empirischer Erhöhung in Kanal 4.

### 3.1.1.2. Regressionsmethode

Bei einer zweiten Methode zur Bestimmung der kanalspezifischen Streustrahlung wird die Intensität jedes Bildpunktes in Kanal 7 gegen seine Intensität in den anderen 3 Kanälen aufgetragen. Die Regressionsgeraden der resultierenden Scattergramme (Abb. 12) schneiden die Achsen der Kanäle 4, 5 und 6. Der Abstand vom Koordinatenursprung entspricht dem jeweiligen Anteil des Streulichts. Nachteil dieser Methode ist, daß mehrere Bildausschnitte berechnet und gemittelt werden müssen, da unterschiedliche Bildinhalte verschiedene Punktwolkenverteilungen und damit variierende Regressionsgeraden zur Folge haben.

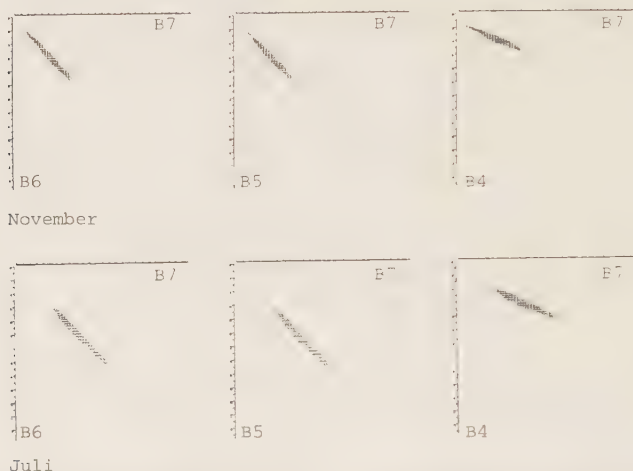


Abb. 12: Scattergramme der Juli und November Aufzeichnungen  
B4, B5, B6, B7 = MSS Kanal 4, 5, 6, 7

### 3.1.2. Korrektur der Beleuchtungsbedingungen

Für den Fall, daß eine Szene ( $185 \times 185 \text{ km}^2$ ) zur Abdeckung eines Untersuchungsgebietes nicht ausreicht, müssen zwei oder mehrere Aufnahmen zu einem Mosaik zusammengesetzt werden.

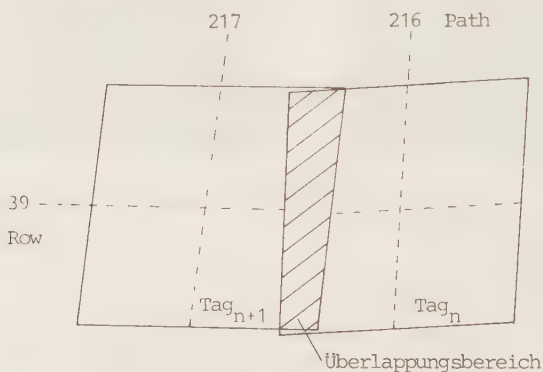


Abb. 13: Benachbarte Szenen mit Überlappungsbereich

Dies ist relativ problemlos, wenn die Aufzeichnungen von zwei aufeinanderfolgenden Tagen bei vergleichbaren Wetterbedingungen stammen. Durch die sonnensynchrone Bahn des Satelliten bleiben die Beleuchtungsverhältnisse annähernd konstant und

Bildhelligkeit bzw. -kontrast beider Szenen damit unverändert, wengleich der westliche Anschluß (217/39) im Überlappungsbereich (Abb.13) etwas dunkler erscheint. Die Ursache hierfür liegt im Sonnenazimut, der für mittlere nördliche Breiten um circa ESE variiert, wodurch der Sensor beim Überflug  $n + 1$  im Überlappungsbereich sozusagen stärker in die Schattenbereiche "schaut". Der auf den Juli-Daten über korrespondierenden Trainingsgebieten ermittelte Faktor für die Szenen 216-217/39 im Überlappungsbereich liegt für alle 4 Kanäle bei ca. 1.05, und kann für die folgenden Verarbeitungen vernachlässigt werden.

Müssen, z. B. aufgrund häufiger Schlechtwetterlagen oder zur Erfassung veränderlicher Phänomene, Szenen aus unterschiedlichen Jahreszeiten miteinander verknüpft oder demselben Rechenalgorithmus unterzogen werden, so bietet sich eine Korrektur der Sonnenelevation an. Dieses Verfahren beruht auf einer einfachen Multiplikation des gesamten Bildes mit einer Konstante, die eine Funktion der Sonnenelevation darstellt.

|           | Juli 216/39 | November 216/39 |
|-----------|-------------|-----------------|
| Elevation | 55°         | 33°             |
| Azimut    | 94°         | 144°            |

Tab. 4: Beleuchtungsverhältnisse derselben Szene im Juli und November.

Am Beispiel je einer korrespondierenden Juli- und Novemberaufzeichnung ergibt sich der Korrekturfaktor nach dem Lambert'schen Gesetz (Kuiper & Middlehurst 1961).

$$I = \frac{D_J / N}{\cos \beta} ; \quad D_J = \frac{D_N \cos \beta_J}{\cos \beta_N} ; \quad D_N = \frac{D_J \cos \beta_N}{\cos \beta_J}$$

wobei  $I$  = Intensität  
 $D_J / N$  = entsprechender Grauwert (Juli, Nov)  
 $\cos \beta_J / N$  = Einfallswinkel der Sonnenstrahlen zum Lot gerechnet

Einfallswinkel = 90° - Höhenwinkel (Elevation)

=) 216/39 Juli = 35°  
 216/39 Nov. = 57°

Eingesetzt in die obige Formel ergibt sich ein Faktor von 1.503 bzw. 0.665 für die radiometrische Anpassung aller Kanäle der November an die Juli-Daten und umgekehrt. Abb. 14 a/b zeigt die Juli- und die angepaßte Novemberaufnahme von Kanal 6. Die Sonnenelevationskorrektur reguliert die Anpassung der

mittleren Helligkeit von flachen Gebieten (Abb.14 nördlich des Stausees) ohne die komplexen Einflüsse des Geländereiefs zu berücksichtigen. In den ebenen Gebieten im Süden und Norden des Testgebiets (Plaines du Draa, Ebene von Ouarzazate), zeigt die Anpassung gute Ergebnisse. Durch diese "quasi" Normierung können dynamische Prozesse, wie z.B. zeitlich variierende Vegetationsflächen, in ihrer Verteilung und Vitalität unabhängig von der Beleuchtungsintensität besser erfaßt und interpretiert werden.

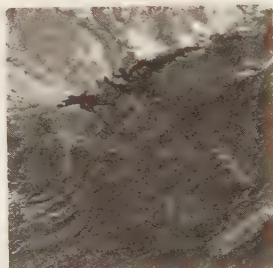
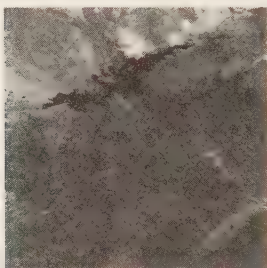


Abb.14a: Juliaufzeichnung vom  
Stausee von Ouarzazate

Abb.14b: Novemberaufzeichnung  
radiometrisch angepaßt  
an die Daten vom Juli

### 3.1.3. Diskussion

Die Elimination des Streulichts und die Anpassung der Beleuchtungsverhältnisse sind beides radiometrische Korrekturen erster Ordnung (Chavez, 1975).

Atmosphärische Korrekturen sind sowohl für die quantitative Auswertung als auch für die Weiterverarbeitung von wesentlicher Bedeutung.

Der Streulichtanteil ist eine additive Konstante, die für jeden Kanal gesondert bestimmt und von jedem Bildpunkt einer Szene subtrahiert werden muß. Dies wird rechnerisch gelöst, indem in einem orthogonalen Input - Output System eine Transformationsgerade  $T$  mit der Steigung 1 ( $45^\circ$ ) vom Koordinatenursprung um den entsprechenden Streulichtanteil  $\Delta s$  verschoben wird. Dabei bleibt die Varianz der Grautonverteilung unverändert. (Abb. 15).

Für die quantitative Auswertung der multitemporalen Daten wurden die Werte von Abb. 10a herangezogen. Für die Bildoptimierung bei den Ratioverarbeitungen mußten die Werte für den grünen Spektralbereich (Kanal 4) empirisch erhöht werden. Nicht korrigiert in diesem Zusammenhang ist der, mit steigendem Streulicht anwachsende Verwaschungseffekt, verursacht durch eingestreute Nachbarinformationen (Sørensen, 1978). Er wird durch die Modulations Übertragungsfunktion beschrieben und kann durch Filterverfahren (Kap.II.5.1.2.) kompensiert werden. Die Beseitigung der Streulichtanteile führt zu einer Normie-

zung der MSS-Kanäle im unteren Bereich. Eine Linearität der Daten ist bereits durch die Vorverarbeitung der Bodenstation gegeben. Zur Umrechnung der Videodaten in echte Reflexionsgrößen wären zusätzlich Referenzmessungen im Bereich stark reflektierender Oberflächen während des Überfluges notwendig. (Stänz, 1978). Da solche Messungen nicht vorliegen, handelt es sich bei den korrigierten Daten nach wie vor um Relativwerte, die jedoch bei entsprechender Kenntnis über einen Faktor umgerechnet werden können.

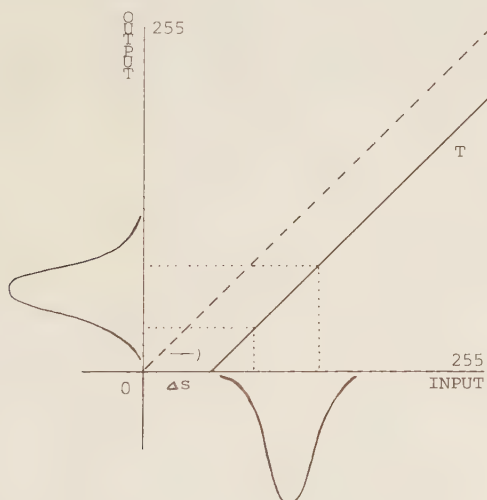


Abb. 15: Streulichtkorrektur

Eine Korrektur der Sonnenelevation kommt nur dann zur Anwendung, wenn Daten unterschiedlicher Jahreszeiten angepaßt bzw. mit gleichen Verarbeitungsparametern prozessiert werden müssen, wobei durch das Relief Grenzen gesetzt sind. In stark reliefierten Bereichen anstehender Gesteinsserien kommt es bei der Korrektur zu einer verzerrten Kontrastverstärkung. Zum einen werden bei der Anpassung der November an die Juli Daten die Schatten erhellt, bleiben in ihrer Ausdehnung jedoch erhalten. Andererseits "reflektieren" Oberflächen, die im November die günstigste Hangexposition für den Strahlengang zum Sensor zeigen, auch im synthetisierten Julibild am stärksten, obgleich hier andere Flächen mit geringerem Fallwinkel (da keine echten Lambert'schen Oberflächen) bevorzugt wären. Die Korrektur verändert also nur die Strahlungsintensität, wobei die Position der Strahlungsquelle konstant bleibt. Im Gegensatz zur Streulichtkorrektur, die auch als Helligkeitsveränderung aufgefaßt werden kann, ist die Elevationskorrektur eine Kontrastverstärkung. Die Transformation wird für alle Kanäle mit demselben Faktor durchgeführt, indem die Steigung der Geraden T verändert wird (Abb.16). Die Varianz der Grautonver-

teilung wird dabei erhöht. Für die numerische Auswertung der Novemberdaten wurde keine Sonnenelevationskorrektur durchgeführt. Tabelle 4 zeigt, daß auch der Sonnenazimut sich über die Jahreszeiten bei der Aufnahme verändert. Sein Einfluß kann ohne aufwendige topographische Modellrechnungen nicht korrigiert werden. Die dadurch auftretende Problematik wird in einem der folgenden Kapitel diskutiert.

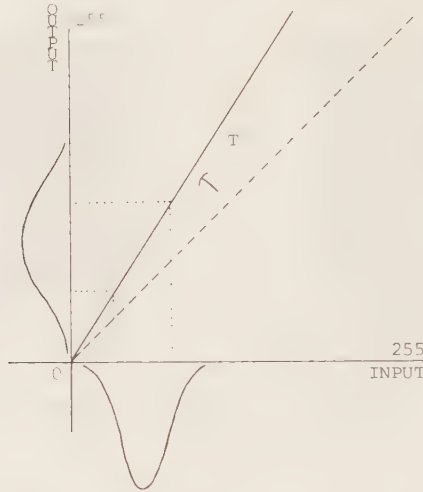


Abb. 16: Sonnenelevationskorrektur

### 3.2. Radiometrische Konvertierung der HCMM-Daten

Die atmosphärischen Einflüsse im thermalen Bereich sind wesentlich komplexer als die im reflektierten Wellenlängenspektrum. Um die Temperatur der Erdoberfläche über Strahlungsmessungen mit einem Satellitensensor bestimmen zu können, müssen mehrere Faktoren in Betracht gezogen werden (Kahle et al., 1981).

- Die Emission der Oberfläche  $L_g(\lambda) = E_x L_{BB}(\lambda, T_g)$
- Die Verringerung der nach oben gerichteten Strahlung durch die Atmosphäre  $\tau(\lambda)$
- Die nach oben zum Sensor gerichtete Strahlung der Atmosphäre  $L_{A+}(\lambda)$
- Die nach unten gerichtete  $L_{A+}(\lambda)$  und von dort wieder zum Sensor reflektierte Strahlung der Atmosphäre  $(1 - E_\lambda)$
- Die Kalibrierung des Sensors

wobei  $L_g(\lambda)$  = Die vom Sensor registrierte spektrale Strahlung

$E_x(\lambda)$  = Emissionskoeffizient

$T_g$  = Bodentemperatur

$L_{BB}(\lambda, T_g)$  = Schwarzkörperstrahlung bei Wellenlänge  $\lambda$  und Temperatur  $T$

Es existieren zahlreiche mathematische Lösungsansätze zum Problem des atmosphärischen Strahlungstransfers, wobei Termini wie Atmosphärendruck, Temperatur und atmosphärische Gasprofile in die Kalkulation mit eingehen. (Aning et al., 1971/ Chandrasekhar, 1960/ Kneizys et al., 1980). Da die Entwicklung von spezifischen Atmosphärenmodellen für die einzelnen Testgebiete noch nicht abgeschlossen waren, wurde von der NASA (1980) ein Standardalgorithmus zur Konvertierung der digitalen Signale in absolute Temperaturen vorgestellt:

$$T_S(DN) = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{DN - K_3} + 1\right)}$$

wobei

$T_S$  = Temperatur in °K mit  $T(0) = 260.0 \text{ °K}$   
 $T(255) = 340.0 \text{ °K}$

$DN$  = Digitaler Zahlenwert eines Pixels (0-255)

$K_1 = 14421.587$      $K_2 = 1251.1591$      $K_3 = -118.21378$

Zur Ableitung dieser Formeln wurde das Planck'sche Strahlungsgesetz, das für einen schwarzen Strahler den Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und der Strahlungsintensität bei der Wellenlänge  $\lambda$  beschreibt, auf den spektralen Empfindlichkeitsbereich des Satelliten (10.5 - 12.5  $\mu\text{m}$ ) angewendet und anschließend nach  $T$  aufgelöst.

$T_s$  kann jedoch im Vergleich zu der Bodentemperatur  $T_g$  abweichen, wobei in der kältesten Region ein um 3 °K zu hoher und in den heißesten Gebieten ein bis zu 11 °K zu niedriger Signalwert auftreten kann. (Short & Stuart, 1982).

Eine der Ursachen für diese Abweichungen, die sowohl von amerikanischen als auch europäischen Forschungsstationen beobachtet worden sind, dürfte in der nach unten gerichteten Strahlung der Atmosphäre  $L_A(\lambda)$  und ihrem reflektierten Anteil (1- $E_A$ ) zu finden sein. Durch diesen Term wird die unterschiedliche Eigenemission von Oberflächen ausgeglichen. Er wirkt

sich auf die separaten Tag- und Nachtaufzeichnungen aus und kann auch durch Differenzbildungen (Tag - Nacht) nicht eliminiert werden.

Abbildung 17 zeigt den funktionellen Zusammenhang zwischen Strahlungsintensität (Grauwerte) und der absoluten Temperatur ( $^{\circ}\text{K}$ ). Hierin ist eine generelle Anhebung aller Temperaturwerte um  $5^{\circ}\text{K}$  (Mitteilung der NASA) berücksichtigt, die auf eine fehlerhafte "pre-flight" Kalibrierung zurückzuführen ist. In den folgenden Beschreibungen werden zum Teil Temperaturangaben verwendet, die jedoch nach wie vor als Relativwerte zu sehen sind.

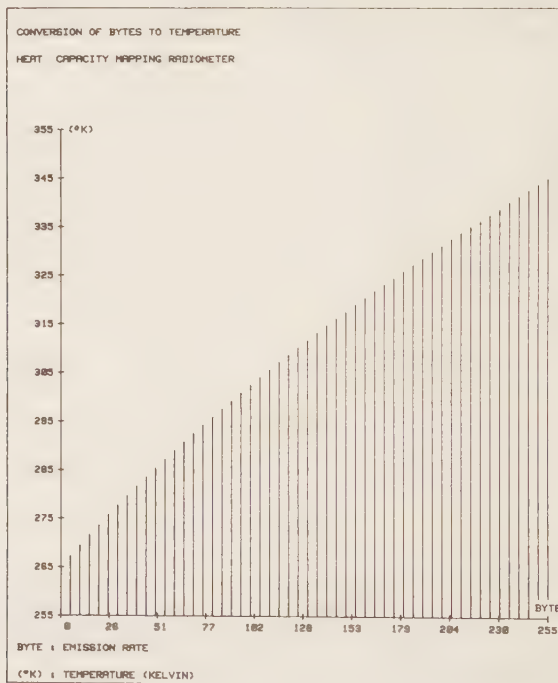


Abb. 17: Graphische Konvertierungstabelle umgesetzt nach numerischen Werten von NASA, (1980).

### 3.3. Geometrische Korrekturen

Geometrische Korrekturen sind erforderlich, um FE-Daten mit thematischen Karten zur Deckung zu bringen, oder Daten unterschiedlicher Sensoren zu überlagern.

Die vom Satelliten übermittelten Bilder entsprechen keiner Standardkartenprojektion. Von Colvocoresses (1974) wurde eine

Space Oblique Mercator-Projektion (SOM) vorgeschlagen, die auf alle von der NASA (seit 1975) und von Earthnet produzierten LANDSAT-MSS Daten angewendet wird. Sie ist, wie das UTM-Gitter, eine Zylinderprojektion, wobei die Tangente zum Berührungskreis nicht Nord-Süd, sondern an der Bahnspur des Satelliten orientiert ist. Dadurch entstehen geringfügige Abweichungen zum UTM-Netz, die vom Äquator zu den Polen hin abnehmen (Carle 1982). Die Thermaldaten (HCM) entsprechen einer Hotine Oblique Mercator-Projektion (HOM), die ebenfalls dem UTM-Gitter angenähert ist. Einen guten Einblick in die Abbildungseigenschaften von Scannern und die Methoden zur geometrischen Korrektur geben Bähr (1978), Carle (1982), Konecny (1972, 1975).

Die mit den SOM- und HOM-Projektionen verbundenen geometrischen Abbildungseigenschaften wurden für die geologische Interpretation in Verbindung mit der Aufgabenstellung für ausreichend befunden. Für die quantitative multitemporale Auswertung mit räumlich konstanten Meßfeldern sowie einer Überlagerung der unterschiedlichen Informationsträger mußten dennoch relative geometrische Anpassungen durchgeführt werden.

Hierzu wurden Subszenen der, zu unterschiedlichen Jahreszeiten aufgezeichneten Daten mit annähernd gleichen Zentralkoordinaten auf den Monitor des Peripheriesystems eingespielt. Über ein Schalterpult können diese wechselweise angesprochen werden, wobei mit Hilfe eines Fadenkreuzes Paßpunkte, also Punkte gleicher Lokalität in Bild A und B festgelegt und vermessen werden. Ihre Anzahl, Verteilung und exakte Lage bestimmen neben dem verwendeten Algorithmus die Qualität des Überlagerungsergebnisses.

Für die quantitative Datenerfassung wurden insgesamt 19 Ausschnitte mit einer Bildgröße von 512 x 512 Bildpunkten (maximale Kapazität des Bildschirms) aus den Juli- (A) bzw. Novembraufzeichnungen (B) von MSS ausgewählt. Für jedes Bildpaar mußten zwischen 20 und 30 Paßpunkte festgelegt und vermessen werden. Bei den Thermaldaten wurde in gleicher Weise verfahren, wobei 13 Tag- und Nachtaufzeichnungen zur Deckung gebracht und ein ausgewählter Satz für die anschließende Überlagerung mit MSS zusätzlich korrigiert werden mußte.

Als nächster Schritt wurden mit Hilfe der Paßpunkte die Koeffizienten für die Transformation bestimmt. Für die MSS-Daten brachte ein Polynom erster Ordnung die besten Ergebnisse; für die Thermaldaten wurde ein Polynom zweiter Ordnung verwendet. Die Anpassung erfolgt über einen "Least Square Fit". Der Berechnung eines Transformationsfiles mit der Rastergröße 32 x 32 Pixel folgt die Transformation der Bildgeometrie durch bilineare Interpolation. Als Grauwert des Pixels wird der des nächsten Nachbarn im Ausgangsbild verwendet. Die Kontrolle der Ergebnisse wurde vom Interpret qualitativ durch wechselseitige Darstellung von Bild A und Bild B vorgenommen.

### 3.4. Diskussion

Die geometrische Korrektur der digital vorliegenden Fernerkundungsaufnahmen erfolgt im wesentlichen in zwei Phasen. In der

ersten Stufe werden über Paßpunkte die Transformationskoeffizienten zur Verknüpfung der Bilder bestimmt. Die zweite Stufe

Polynom 1.Ordnung

$$\begin{aligned}x' &= a_0 + a_1 x + a_2 y \\y' &= b_0 + b_1 x + b_2 y\end{aligned}$$

Polynom 2.Ordnung

$$\begin{aligned}x' &= a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 y^2 + a_5 xy \\y' &= b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 y^2 + b_5 xy\end{aligned}$$

wobei

$$\begin{aligned}x', y' &= \text{Koordinaten des Quellenbildes} \\x, y &= \text{Koordinaten des zu korrigierenden Bildes} \\a, b &= \text{Vektoren (beinhalten Transformations-} \\&\quad \text{koeffizienten)}\end{aligned}$$

beinhaltet die Transformation selbst und die Anpassung der Pixelwerte an den Zellengrenzen des Transformationsfiles durch Interpolation. In beiden Stufen können unterschiedliche Algorithmen zur Anwendung kommen. Die Qualität der Resultate ist somit abhängig von den angewendeten Algorithmen und insbesondere von der interaktiven Bestimmung der Paßpunkte.

Die Wahl der Paßpunkte konzentrierte sich, in Abhängigkeit vom Angebot, auf kleinstmögliche Flächen, die sich von ihrer Umgebung durch starken Kontrast abhoben, aber nicht durch unterschiedliche Höhengniveaus zu umgebenden Oberflächen und dadurch verlängerten Schattenwurf hervortraten. Autopisten, Wasserflächen, Flüsse, Wadis, und die damit in Verbindung stehenden Mündungen, Mäander und Verzweigungen wurden im Gegensatz zu einer Großzahl anderer Autoren nicht verwendet, da sie nicht nur in diesem Klimabereich zeitlich räumlichen Veränderungen unterworfen sind, sondern auch ihr Erscheinungsbild bei unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen variieren kann.

Die Vermessung der Paßpunkte erfolgte für den reflektierten Anteil des Spektrums (MSS) in Kanal 7, da hier der geringe Einfluß des atmosphärischen Streulichts die stärksten Kontraste hervorruft. Die Korrektur wurde für alle 4 Kanäle mit den gleichen Parametern auf die nicht skalierten Bilder (Kap. II,2.) angewendet.

Die Abweichung der transformierten Bilder (B) von den Quellenbildern (A) sind in der vertikalen Achse generell am größten, was auf die Zeilenfrequenz des Monitors und das damit verbundene "Flimmern" des Cursors in dieser Ebene zurückzuführen ist. Die bei der Berechnung der Transformationskoeffizienten ermittelten Restfehler übersteigen in keinem Fall die Größenordnung von zwei Bildelementen, (typisch 1).

Die Thermalaufzeichnungen liegen nur einkanalig vor. Alle verfügbaren Tag-Nachtaufnahmen wurden zusammen mit den panchromatischen Aufnahmen des sichtbaren Kanals für eine multitemporale Auswertung auf die Geometrie der Szene A0051-02340-3 vom 16.06. gebracht.

Eine absolute geometrische Korrektur aller Reflexions- und Emissionsdaten auf ein gemeinsames Referenznetz wurde aus folgenden Gründen nicht durchgeführt: Die vorhandenen topographischen Karten waren gegenüber dem Detailreichtum der MSS-Bilder zu ungenau, gegenüber den HCMM-Daten dagegen zu großmaßstäblich. Für den quantitativen multitemporalen Ansatz (Kap. IV.V.) wären zudem die relativen Anpassungen der Geländeausschnitte mit größeren Abweichungen behaftet.

#### 4. Quantitative Datenerhebungen

Die numerische Erfassung der von unterschiedlichen Oberflächen remittierten Strahlung dient sowohl der Festlegung von Korrektur- und Verarbeitungsparametern, als auch der synoptischen graphischen Darstellung und den damit verbundenen methodischen Vergleichsmöglichkeiten. Sie kann zudem als Objektivierung subjektiver Rangordnungen gesehen werden. Atmosphärische Korrekturen und geometrische Anpassungen sind vor der Datenerhebung durchgeführt worden (Kap. II,3.).

##### 4.1. Auswahl von Messfeldern und Profilen

In Abhängigkeit von der unterschiedlichen Bodenauflösung des MSS und HCMR sowie der Ausdehnung der photogeologisch differenzierbaren Gesteinsoberflächen erfolgte die quantitative Datenerfassung nach zwei verschiedenen Methoden. Für die MSS-Daten wurden Trainingsfelder, sogenannte Overlays verwendet (Abb. 18 a); für die geringauflösenden HCMR-Daten mußte auf Profillinien zurückgegriffen werden (Abb. 18 b). Die Auswahl und Auswertung der Overlays wie die Festlegung der Profile erfolgte nach photogeologischen Gesichtspunkten mit Hilfe des interaktiven Peripheriesystems. Um den statistischen Fehler so gering wie möglich zu halten, wurde versucht, die Overlays in ausreichender Größe zu gestalten. Die Auswertung der Intensitätsprofile mußte mittels gedruckter Kurven von Hand vorgenommen werden.

Die Datenorganisation des interaktiven Systems ist so aufgebaut, daß Originaldaten entweder in 8 bit ohne Overlays oder in 6 bit + zwei getrennten Zeichenmöglichkeiten (Overlays) gespeichert werden können. Durch die Vorverarbeitung der Bodenstation ESRIN werden jedoch "Originaldaten" mit einem Umfang von bis zu 128 Graustufen (7 bit) erzeugt. Nur durch laufende Umprogrammierung der Speicherorganisation auf 7 bit + 1 Overlay und zusätzliche Transformationen war es möglich, die Daten ohne Beeinträchtigung des Dynamikbereiches mit Trainingsfeldern zu überlagern und auszuwerten.

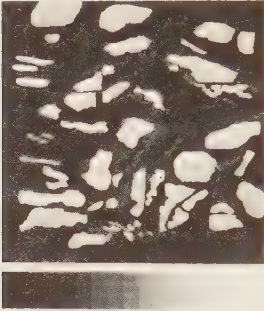


Abb.18a: 7-bit Daten mit 1-bit durchscheinendem Overlay zur quant. Statistik der LANDSAT-MSS Daten

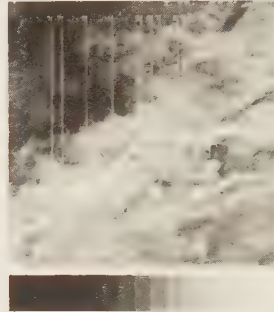


Abb.18b: Rechnerprofile zur Mittelwertbestimmung auf HCMR-Daten

#### 4.2. Bildstatistik

Mit Hilfe des Statistikmodus können vom gesamten Bild (512 x 512 Pixel) oder von jedem, mit einem Overlay belegten Bereich folgende Parameter am Monitor ermittelt werden.

- Anzahl der Bildelemente (Pixel)
- Mittlere Intensität
- Standardabweichung
- Größter und kleinster auftretender Wert
- Quartilwerte
- Histogramm (Anzahl der Pixel pro Grauwert)
- Kumulative Häufigkeitsverteilung

Aus den Emissionsprofilen der Thermaldaten lassen sich lediglich die mittlere Intensität bzw. die konvertierten Temperaturwerte ableiten.

Alle ermittelten Werte beziehen sich auf photogeologisch kartierte und im Gelände zugeordnete Einheiten (Abb. 47). Die gemessenen mittleren Intensitäten in den 4 MSS-Kanälen sind neben den mittleren Tag- und Nachtemissionswerten als spektrale Merkmale zusammen mit den Geländedaten in Kap.IV. graphisch dargestellt. Die Darstellungen zeigen multitemporale Werte der Rohdaten, wobei die Streulichtkorrekturen für MSS bereits angewendet sind.

#### 4.3. Konzept der thermalen Trägheit

Die thermale Trägheit für homogenes Material läßt sich berechnen aus:

$$P = (K \text{ } \delta \text{ } c)^{\frac{1}{2}}$$

wobei

- $\rho$  = Dichte ( $\text{g/cm}^3$ )
- $c$  = Wärmekapazität ( $\text{cal g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
- $K$  = thermale Leitfähigkeit ( $\text{cal cm}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

Ihre Ableitung aus Satellitendaten der HCMM war eines der favorisierten Konzepte der NASA-Wissenschaftler. Sie basiert auf einer Kalkulation der simultanen Aufzeichnung reflektierter Sonnenstrahlen mit thermalen Tag-IR und den folgenden Nacht-IR-Emissionen. Die sogenannte "apparent thermal inertia" (ATI) berechnet sich aus

$$\text{ATI} = \text{NC} (1-a) / (\Delta T)$$

wobei

- $N$  = ganzzahliger Skalierungsfaktor ( $N=1000$ )
- $C$  = Skalierungsfaktor für die Sonneneinstrahlung in Abhängigkeit vom Breitengrad
- $a$  = Pixelwert des sichtbaren panchromatischen Kanals
- $\Delta T$  = Temperaturdifferenz der korrespondierenden, geometrisch angepaßten Tag-Nacht-Sequenz.

Wie durch den Zusatz "apparent" ersichtlich ist, stellt die aus den HCMM-Daten für unterschiedliche Gesteinskörper kalkulierbare thermale Trägheit keinen reellen, absoluten Wert dar. Die bereits in Kap.II.3.2. erörterten Einflußparameter wirken sich hier noch kumulierend aus. Einen umfassenden Einblick, über unterschiedlichste meteorologische, topographische und sonstige Einflüsse und ihre Auswirkungen auf die ATI, gibt eine Arbeitsgruppe des Jet Propulsion Laboratory (Kahle et al., 1981).

Durch die Orbitcharakteristik war eine Tag- Nachtaufzeichnung im 12-Stundenintervall für den bearbeiteten Bereich in Marokko nicht möglich (NASA, 1980). Nachdem auch keine Daten im theoretisch möglichen 36-Stunden Zyklus aufgezeichnet werden konnten wurden von der NASA zeitlich nicht aufeinanderfolgende Daten zur Berechnung eines  $\Delta T$  und ATI-Bildes herangezogen. Diese Produkte waren mit starken geometrischen Überlagerungsfehlern behaftet, so daß auf eine numerische und qualitative Beurteilung von beiden verzichtet werden mußte.

#### 4.4. Diskussion

Die numerische Auswertung liefert Daten für unterschiedliche Aufgabenbereiche. Die Erfassung und graphische Darstellung spektraler Merkmale (Signaturen) dient sowohl dem wechselseitigen Vergleich verschiedener Oberflächen, aber auch der Diskussion gleicher Oberflächenphänomene unter zeitlich und räumlich veränderten Rahmenbedingungen wie Sonnenstand, Hangexposition, Vegetationsbedeckung, Krustenbildung etc. Die zur Diskussion herangezogenen mittleren Intensitäten entsprechen keinen absoluten Reflexionsgrößen bzw. Temperaturangaben.

Die Texturmerkmale sind nicht quantitativ erfaßt. Die Standardabweichung kann als statistischer Texturparameter gesehen werden, jedoch ohne jede räumliche Beziehung.

Neben diesen methodischen Untersuchungen spektraler Merkmale spielt die numerische Auswertung eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung von Korrektur- und Verarbeitungsparametern. Im Vordergrund stehen dabei die Berechnung von Schwellenwerten und Histogrammen. Sie bilden neben empirischen Werten auch die Basis für alle Bildoptimierungsverfahren.

## 5. Datenoptimierungsverfahren

Mit Hilfe der Computertechnologie können Rohdaten von Zeilenabtastern in mannigfaltiger Weise modifiziert und kombiniert werden. Ziel der Optimierungsverfahren ist die bestmögliche Hervorhebung und Darstellung von Bildinhalten.

Dabei können je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Algorithmen zur Betonung von Albedo-, spektralen oder textuellen Informationen Anwendung finden. Im folgenden wurden die am Institut verfügbaren Programme genutzt, um die, mit den entsprechenden Produkten verbundenen Möglichkeiten und Grenzen für geologische Fragestellungen, am Beispiel eines Szenenausschnittes aus dem Anti-Atlas, zu demonstrieren und zu diskutieren.

### 5.1. Einkanalige Verarbeitungen

Kontrastverstärkende bzw. -modifizierende Verarbeitungen werden getrennt auf jeden Kanal einer multispektralen Aufzeichnung angewendet. Sie unterteilen sich in Streckungen und damit Neuverteilungen der Grauwerte eines Bildes (engl: contrast enhancement), und in Kantenverstärkungs-Algorithmen (engl: edge enhancement). Beide Verfahren, die im englischen Sprachgebrauch unter dem Begriff "image enhancement" zusammengefaßt werden, verbessern die Detailerkennbarkeit und Interpretationsmöglichkeit der Bilder.

#### 5.1.1. Kontrastverstärkung

Für eine Streckung bzw. Kontrastverstärkung muß das Histogramm des entsprechenden Kanals berechnet werden. Um ein möglichst kontrastreiches Bild über die gesamte Szene zu erhalten, werden die in dem jeweiligen Kanal auftretenden Grauwerte durch Einfügen von 0-Stellen über eine Transformationsgerade bzw. -tabelle auf den verfügbaren Umfang von 8-bit (0-255) gestreckt. Der Kontrast wird umso stärker, je enger die beiden Schnittstellen gesetzt werden. Konzentriert sich das Interesse nur auf bestimmte Bereiche oder Oberflächen einer Szene, können interaktiv Intervallgrenzen d. h. der niedrigste bzw. höchste vorkommende Grauwert ermittelt, und alle in diesem Intervall befindlichen Daten zwischen 0 und 255 gestreckt werden. Für die Daten innerhalb der Grenzwerte ergeben sich sehr hohe Bildkontraste, wobei die außerhalb der Grenzwerte

liegenden Daten dem Wert 0 bzw. 255 zugeordnet werden. Diesen extremen Kontrastmanipulationen sind jedoch Grenzen gesetzt, da sich mit zunehmendem Kontrast das Signal/Rausch-Verhältnis verschlechtert.

Für die Kontrastmodifikation der Daten bietet sich eine Reihe von Möglichkeiten an, die letztendlich alle auf den stufenweisen Aufbau einer Transformationsgeraden (T) bzw. auf sogenannte Look-up-Tabellen zurückzuführen sind. Abb. 19 zeigt schematisch einige typische Beispiele.

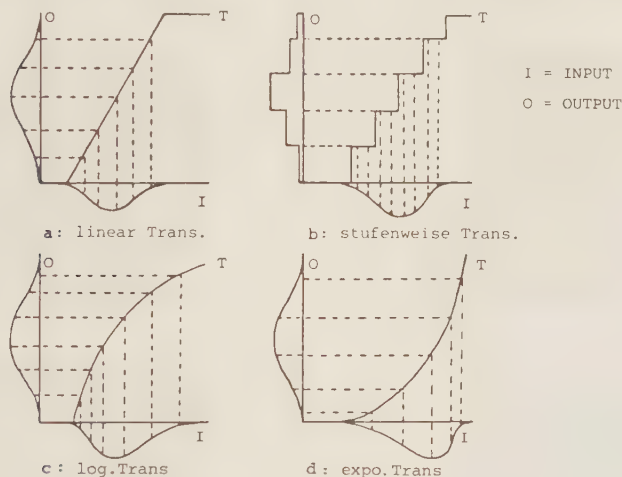
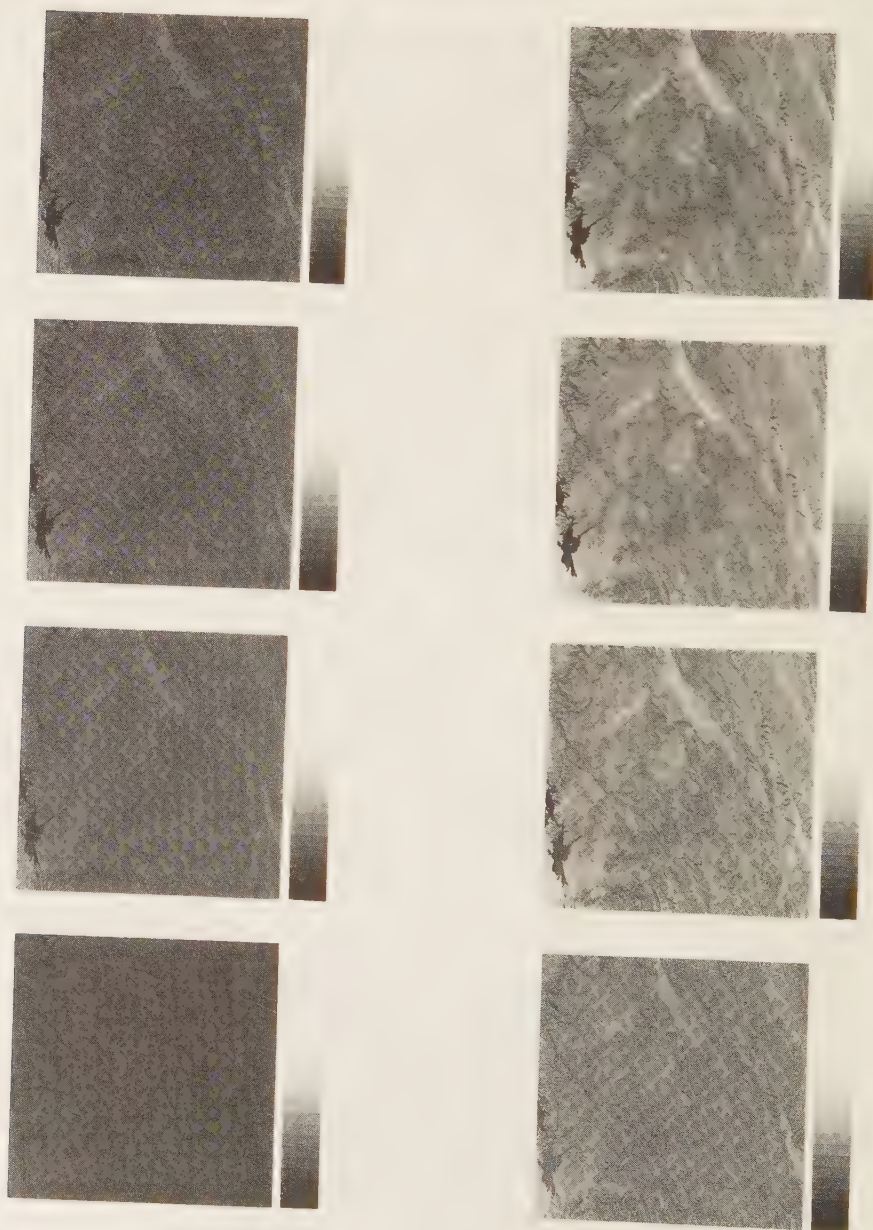


Abb. 19: Transformationsbeispiele

Für normalverteilte Histogramme wird eine lineare Transformation bevorzugt (Abb. 19 a). Auf diese Weise kontrastverstärkte Daten lassen den bestmöglichen Rückschluß auf das spektrale Verhalten von Oberflächen erwarten. Abb. 19 b zeigt den stufenweisen Aufbau einer Transformationstabelle, die die kontinuierliche Grautonverteilung eines Bildes in eine Serie von Intervallen überführt. Diese, auch Äquidensiten- oder "density slicing" genannte Darstellung führt zu einer Datenreduktion und ist für eine detaillierte qualitative Auswertung nicht geeignet. Über eine logarithmische Transformationsfunktion (Abb. 19 c) bzw. ihre Umkehrfunktion (Abb. 19 d) können schiefe Verteilungen in Normalverteilungen überführt werden. Mit ihrer Hilfe lassen sich bestimmte Bildkontraste auf Kosten anderer verstärken. Eine vorgezogene lineare Streckung ist oft angebracht. Es muß jedoch darauf geachtet werden, daß im Kompressionsbereich unterschiedliche (benachbarte) Werte nicht zusammengefaßt werden.

Für die auszuwertenden Daten wurden lineare Transformationen angewendet. Der Grautonumfang der November Aufzeichnungen be-



RAW= ungestreckte Daten    ENH= kontrastverstärkte Daten

Abb. 20: Originalkanäle der Juliaufzeichnung, MSS 4, 5, 6, 7

trägt im Kanal 4 vierzig, in den Kanälen 5, 6, 7 achtzig Grauwerte. Für die Juli Daten beträgt der Umfang fünfzig bzw. hundert Graustufen.

Abb. 20 zeigt die 4 MSS-Kanäle der Juli-Aufzeichnungen im Original und nach der Kontrastverstärkung bei Schwellenwerten von 2 % bzw. 98 %.

### 5.1.2. Kantenverstärkung (Filterverfahren)

Eine typische Charakteristik jedes Bildes ist ein Parameter, der räumliche- oder Ortsfrequenz genannt wird. Er beschreibt die Häufigkeit des räumlichen Wechsels von hellen und dunklen Objektele menten. Die Ortsfrequenzfilterung ist eine Rechenoperation, die es ermöglicht, ein Bild mit seinen komplexen hell-dunkel Variationen in hochfrequente (high pass) und niederfrequente (low pass) Anteile zu zerlegen. Allen hier durchgeführten Operationen liegen "Box-Car"-Filter zugrunde. Als Literaturverweise zu diesen Filterungen im Ortsraum seien genannt Gillespie (1976), Chavez et al. (1977).

#### 5.1.2.1. Räumliche Filterung

Bei räumlichen Filtern wird jeder Pixelwert zu seinen umgebenden Nachbarwerten in Relation gesetzt, wobei die Filtergröße vorgegeben werden muß. Ein Low-Pass gefiltertes Bild (Abb. 21 b) wird erzeugt, indem ein neuer Mittelwert für jeden einzelnen Bildpunkt einer Szene unter Einbeziehung seiner Umgebung errechnet wird. Bei einer Filtergröße (Matrix) von z.B. 3 x 3 Bildelementen, wird also der zentrale Pixelwert durch den Mittelwert, berechnet aus allen neun Bildpunkten, ersetzt. Subtrahiert man jeden Pixelwert des Low-Pass Bildes von seinem korrespondierenden Wert im Originalbild (Abb. 21 a), so erhält man ein High-Pass gefiltertes Bild (Abb. 21 c). Um den Kontrast des Originalbildes zu verstärken, kann das High-Pass gefilterte Bild zum Originalbild addiert werden (Abb. 21 d). Durch Verwendung unterschiedlich großer Filterzellen (Abb. 22 a, b, c) können Strukturen unterschiedlichen Ausmaßes verstärkt bzw. unterdrückt werden.

#### 5.1.2.2. Richtungsbezogene Filterung

Eine zusätzliche Kantenverstärkung, d. h. eine Kontraststeigerung der hochfrequenten Grautonvariationen kann erreicht werden, indem das gesamte Bild um je ein Pixel in der Vertikalen und/oder in der Horizontalen verschoben wird. Dabei werden die Grautondifferenzen korrespondierender Pixel zwischen dem Originalbild und dem verschobenen Originalbild ermittelt. Besteht keine Differenz, wird ein mittlerer Grauton eingesetzt. Negative und positive Werte werden durch entsprechende dunklere bzw. hellere Grautöne substituiert. Die Ergebnisbilder zeigen ähnlich wie das High-Pass Bild einen monotonen grauen Hintergrund, jedoch mit stark hervortretenden schwarz-weißen Konturen, die die hochfrequenten Bildinhalte nachzeichnen. Diese, mittels der Differenzmethode durchgeführte Kantenverstärkung, ist immer richtungsbezogen, wobei Strukturen senk-



Abb. 1 Ein LANDSAT Kanal MS3-7 gestreckt auf 8-bit (256 Grauwerte). Die Aufzeichnung entspricht dem Ausschnitt der Abbildung 1.



Abb. 21b: Niederfrequente Anteile von Kanal MSS-7  
(Low-Pass) 3x3 Matrix.



Abb. 21c: Hochfrequente Anteile von Kanal MSS-7  
(High-Pass) 3x3 Matrix



Abb. 21d: Kanal MSS-7 (Abb. 21a) mit addiertem High-Pass  
(Abb. 21c) 3x3 Matrix



Abb. 22a: Kanal MSS-7, High-Pass Filter mit 7x7 Matrix

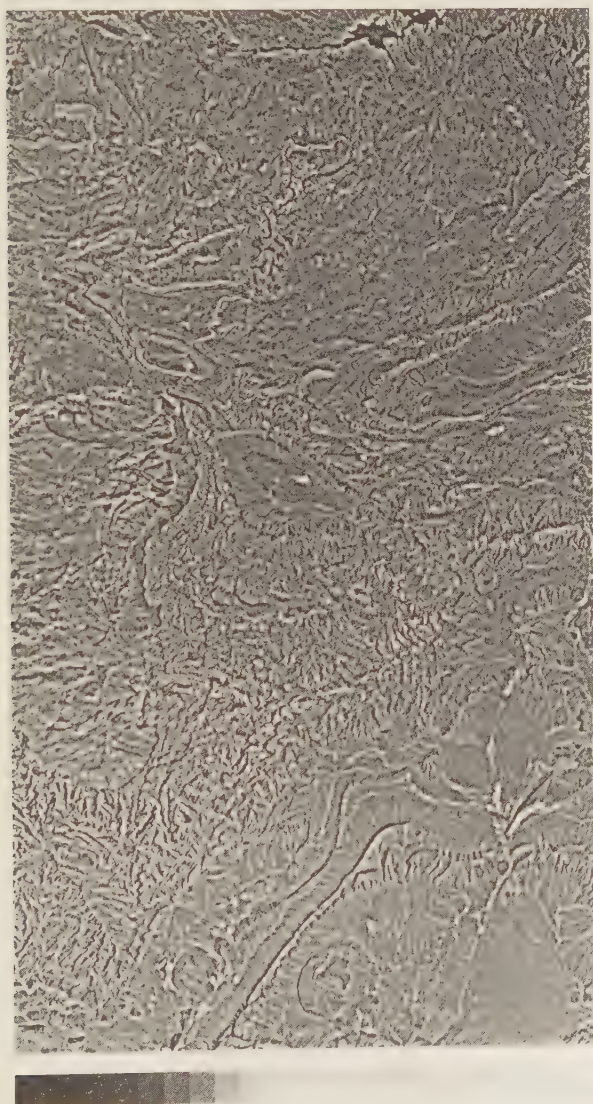


Abb. 22b: Kanal MSS-7 High-Pass Filter mit 15x15 Matrix



Abb. 22c: Kanal MSS-7 High-Pass Filter mit 31x31 Matrix

recht zur jeweiligen Verschiebung (Laufrichtung des Filters) am deutlichsten verstärkt, jene parallel dazu unterdrückt werden. Abb. 23 a,b,c zeigen solche Filterbeispiele mit unterschiedlichen Verschiebungswinkeln und -richtungen.

### 5.1.3. Diskussion (einkanaliger Verfahren)

Die Kontrastverstärkung oder Streckung der Grauwerte eines Bildes ist vom Dynamikbereich jedes Kanals und der gestellten Aufgabe abhängig. Sie wird auf der Grundlage der berechneten Histogramme für jeden Spektralauszug getrennt durchgeführt und steht in der Regel am Ende eines oder mehrerer Verarbeitungsprozesse, da fast alle Rechenoperationen auf ungestreckte Originaldaten angewendet werden. Für die Ergebnisbilder müssen erneut Histogramme berechnet werden, um daraus die Transformationsfunktionen für eine optimale Streckung abzuleiten. Die Kontrastverstärkung ermöglicht dem Interpretieren eine verbesserte und gezielte Abgrenzung auch geringfügigster kanalspezifischer Reflexionsunterschiede, wobei im Falle einer Datenverknüpfung, wie z.B. im Falschfarbenbild, auch die spektralen Variationen entsprechend hervorgehoben werden.

Kantenverstärkungsverfahren basieren auf digitalen Filtern, die die Grautonvariationen eines Bildes in Bezug auf ihre räumliche Frequenz modifizieren. Die lineare Auflösung bleibt erhalten, wenn auch die verschiedenen Filter einen optisch schärferen oder verschwommeneren Eindruck bewirken. Die Zerlegung der räumlichen Bildfrequenzen in ihre hoch- und niederfrequenten Anteile verbessert entweder die Ansprache von Strukturen und Texturen oder die Differenzierung von Albedo- und Signatureigenschaften, ohne richtungsbezogene Abhängigkeit. Die Größe der Matrix eines Filters bestimmt das Ausmaß der zu verstärkenden bzw. zu unterdrückenden hell-dunkel Variationen im Bild. Die Filterung mit einer endlich großen Zelle (gesamter Bildumfang) ergäbe einen einheitlichen Grauton, entsprechend dem Mittelwert des Originalbildes im Low-Pass, und das, um diesen Grauwert pro Pixel verminderte Originalbild im High-Pass.

Für die strukturgeologisch orientierte Auswertung der MSS-Aufzeichnungen waren in Abhängigkeit der Bodenpixelgröße das reine High-Pass Produkt und die mit den Originaldaten addierte Version mit einer kleinen Matrix (3 x 3, 5 x 5) am besten geeignet. Bei Verwendung größerer Filtermatrizen (Abb. 22 a, b, c) treten neben den gewünschten Effekten in zunehmendem Maße die Albedoeigenschaften der unterschiedlichen Oberflächen wieder in Erscheinung, die an ihren Grenzen durch "Licht- und Schattenhöfe" verfälscht werden. Bei der Auswertung reiner High-Pass Bilder ist zudem darauf zu achten, daß alle kurzfrequenten hell-dunkel Variationen verstärkt werden, also nicht nur Strukturen die auf Licht/Schatten und damit auf die Morphologie zurückzuführen sind, sondern auch die Kanten, die an Grenzen unterschiedlich stark reflektierender Oberflächenphänomene auftreten wie z. B. Wasser zu Land, helle Alluvionen zu umgebenden Gesteinskörpern, oder anthropogene Erscheinungen, die oft ohne Albedoinformation nicht als solche identifiziert werden können. Für die HCMM-Aufzeichnungen wurde keine Kantenverstärkung durchgeführt. Die geringe Bodenauflösung sowie

das den Originaldaten anhaftende schlechte Signal-Rausch Verhältnis ließen keine verbesserte Interpretierbarkeit erwarten.

Low-Pass Filterungen wurden für MSS- und HCMM-Daten mit kleinen Filtergrößen durchgeführt. Sie verbessern die Erfassung flächiger hell-dunkel Areale durch die Unterdrückung der Textur (MSS). Ebenso sind sie geeignet, das meist hochfrequente Rauschen in Bildern zu unterdrücken (HCMM). Größere Filterzellen sind weniger geeignet, da die Grenzen zwischen unterschiedlichen Oberflächen in zunehmendem Maße unscharf abgebildet werden.

Es bleibt zu erwähnen, daß mit Hilfe anderer Filtermethoden wie Gradientbildung, La Placian oder Fourier Transformationen leicht abweichende, nur zum Teil bessere Ergebnisse erzielt werden. Für die aus photogeologischer Sicht nicht gravierenden Verbesserungen müssen jedoch erheblich steigende Rechenzeiten in Kauf genommen werden.

Im Gegensatz zu räumlichen Filtern stehen richtungsbezogene Filter. Mit ihrer Hilfe können hochfrequente Grautonvariationen einer bestimmten Richtung verstärkt bzw. unterdrückt werden. Bedingt durch den pixelweisen Bildaufbau bieten sich je eine Richtung parallel und senkrecht zur Abtastrichtung und die beiden Diagonalen an. Abb. 23 a + b zeigen je einen Filter in NW und NE-Richtung, d. h. eine Verschiebung der Daten nach der Differenzmethode (5.1.2.2.) in die entsprechende Richtung. Dabei werden die senkrecht dazu liegenden hohen Bildfrequenzen, wie z. B. geologische Strukturen, stark hervorgehoben; die parallel dazu liegenden unterdrückt. Die Vorteile dieser Algorithmen für spezielle Anwendungen stehen jedoch in keinem Verhältnis zu den dabei auftretenden Nachteilen. Eine nähere Betrachtung der Regionen geringerer Reliefenergie, wie z. B. der Plaines du Draa im südöstlichen Bildbereich, verdeutlicht das Auftreten von interferenzähnlichen Artefakten, spitzwinklig zu den Filterrichtungen (ENE bzw. WNW). Während hier eine Trennung von echten Bildinhalten noch teilweise möglich scheint, ist sie in Regionen starker Morphologie praktisch nicht durchführbar.

Die Komplexität dieser Problematik wird um so deutlicher, wenn man zwei parallel verlaufende Filter gegensätzlicher Richtungen (NW; SE) miteinander vergleicht. Das SW-Filterergebnis (Abb. 23 c) zeigt gegenüber dem NE-Filter (23 b) eine Drehung der Interferenzlinien von ENE - WSW nach NNE-SSW, eine Beobachtung, die nur auf das Zusammenwirken von Beleuchtungsverhältnissen mit den gegenseitigen Versatzrichtungen der Daten zurückzuführen ist.

Resümierend kann festgestellt werden, daß mit Hilfe von Filterverfahren Bildinhalte unterschiedlicher photogeologischer Kategorien, wie Texturen oder großflächigen Albedoeigenschaften unterdrückt werden können, wodurch jeweils eine der beiden mehr in den Vordergrund tritt. Eine Low-Pass Filterung unterdrückt Texturen, wobei die Albedo- bzw. spektralen Merkmale von Oberflächen deutlicher hervortreten. Im Gegensatz dazu können durch High-Pass Filterung Texturen ohne Einfluß vom unter-



Abb. 23a: Kanal MSS-7, Richtungsfilter NW. Pfeile kennzeichnen die Richtung der auftretenden Artefakte



Abb. 23b: Kanal MSS-7, Richtungsfilter NE. Pfeile kennzeichnen die Richtung der auftretenden Artefakte



Abb. 23c: Kanal MSS-7, Richtungsfilter SW. Pfeile kennzeichnen die Richtung der auftretenden Artefakte

schiedlichen Reflexionsvermögen der jeweiligen Oberflächen erfaßt werden. Das mit einem High-Pass addierte Originalbild stellt gewissermaßen einen Kompromiß dar. Die Kontrastverstärkung feinsten Strukturen führt zu geringeren Albedodifferenzen im einzelnen Spektralauszug und damit letztlich zu einer etwas abgeschwächten spektralen Information in einem Falschfarbenauszug. Aus diesen Gründen sollte für hoch korrelierte Bildinhalte auf eine Addition mit High-Pass Filterung verzichtet werden.

Die Wahl der zur Bildoptimierung verwendeten Filter wird also durch die Bildinhalte, durch das Auflösungsvermögen des Sensors und die gestellte Aufgabe bestimmt, wobei gezielte Auswertungen die Verwendung mehrerer Produkte erfordern können. Die Verfahren sollten sich dabei auf räumliche Filter beschränken; richtungsbezogene Filter sind aufgrund der vorgenannten Erscheinungen eher negativ zu bewerten.

### 5.2. Mehrkanalige Verarbeitungen

Korrektur- und Kontrastverstärkungsverfahren werden jeweils getrennt auf einzelne Spektralauszüge oder deren Verarbeitungen angewendet. Die multispektrale Aufzeichnung, z.B. des LANDSAT-Systems, eröffnet die Möglichkeit, zwei- und mehr Kanäle durch unterschiedliche Rechenoperationen miteinander zu verknüpfen. Dies ist gewährleistet durch die simultane, pixeldeckende Aufzeichnung des MSS-Sensors, bei dem das Reflexionssignal jedes Bodenelementes über den oszillierenden Scanspiegel auf ein System von Prismen und Filtern geleitet wird und dort, aufgetrennt in die vier Spektralkanäle, den einzelnen Detektoren zugeführt wird. Sollen multitemporale Daten oder Daten unterschiedlicher Sensoren miteinander verknüpft werden, so müssen zuerst geometrische Anpassungen durchgeführt werden (Kap. II 3.3.).

Betrachtet man Originalaufzeichnungen der vier LANDSAT-MSS-Kanäle (Abb. 20), so wird deutlich, daß die verschiedenen Oberflächen (Böden, Gesteine) in der Regel nur geringe spektrale Intensitätsunterschiede aufweisen, wobei die "Albedo" große Differenzen aufweisen kann. Stark (hell) oder gering (dunkel) reflektierende Oberflächen behalten ihre relativen Reflexionseigenschaften, die Vegetation ausgenommen, in allen vier Kanälen im wesentlichen bei.

Aus diesem Grunde haben sich unter einer Vielzahl von möglichen Rechenoperationen hauptsächlich Datenreduktionsverfahren wie Ratioberechnungen und Hauptachsentransformationen zur Verdeutlichung der spektralen Eigenschaften als zweckdienlich erwiesen. Einen verständlichen Einblick in die Anwendung dieser Verfahren geben Blodget et al. (1978), Goetz et al. (1975), Rowan & Kahle (1982), Taylor (1974).

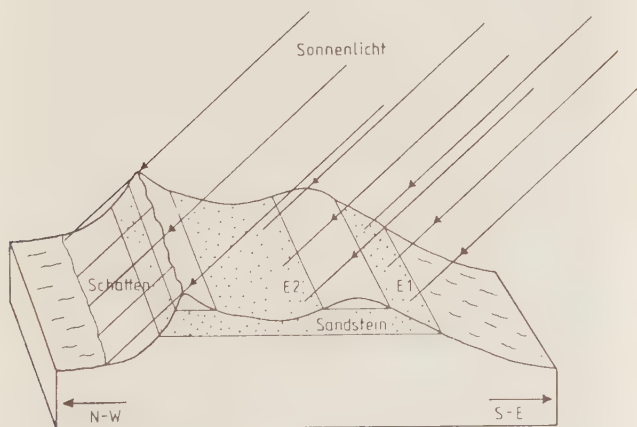
#### 5.2.1. Ratiotransformationen

Ratio- oder Verhältnisbilder werden berechnet, indem die Grauwerte aller Pixel eines Kanals durch die Grauwerte der korrespondierenden Pixel eines zweiten Kanals dividiert werden. Dabei können Zähler und Nenner mit additiven und multiplikativen Konstanten versehen werden.

$$R = \frac{(\text{Kanal X} + \text{Kadd1}) * \text{Kmul1}}{(\text{Kanal Y} + \text{Kadd2}) * \text{Kmul2}}$$

Um die Werte zwischen 0 und 1 (für Kanal Y > Kanal X) darstellen bzw. abbilden zu können und den Fehler bei der Rundung auf natürliche Zahlen gering zu halten, muß der Zähler mit einer entsprechend hohen Konstanten (hier 100) multipliziert werden. Mit Hilfe der additiven Konstanten muß die Differenz des atmosphärischen Streulichtanteils beider Kanäle ausgeglichen werden. (Kap. II 3.1.1.).

Die wesentlichen Vorteile von Ratioverfahren liegen in der Kompensation der Beleuchtungseinflüsse und von Albedounterschieden (Abb. 24). Wie die Tabelle in Abb. 24 zeigt, bleibt auf der Grundlage des Reflexionsgesetzes das Verhältnis zweier Kanäle, bezogen auf eine gleiche aber unterschiedlich beleuchtete Oberfläche, annähernd konstant. Der leichte Anstieg für Schattenbereiche im Ratio 4/5 (0.44) ist auf verstärkte atmosphärische Streueffekte in Kanal 4 (siehe Kap.II.3.1.1.1.) zurückzuführen.



Sandstein Reflexion

| Beleuchtung | Band 4 | Band 5 | Band 7 | Ratio 5/7 | Ratio 4/5 |
|-------------|--------|--------|--------|-----------|-----------|
| E1          | 27     | 70     | 82     | 0.85      | 0.38      |
| E2          | 22     | 56     | 66     | 0.85      | 0.39      |
| Schatten    | 11     | 25     | 29     | 0.86      | 0.44      |

Abb. 24: Kompensation der Beleuchtungseinflüsse durch Ratioverfahren modifiziert nach Sabins, (1978)



Abb. 25a: Ratio 4/5 kontrastverstärkt; abgebildet sind die spektralen Unterschiede ohne Einfluß der Albedo. Pfeile zeigen deutlich abgehobene Serpentinflächen. Vergleiche Abb. 21 und 47.



Abb. 25b: Ratio 4/6 kontrastverstärkt



Abb. 25c: Ratio 4/9 kontrastverstärkt. Deutlichste gegenseitige Abgrenzung lithologischer Oberflächen. Dies gilt sowohl für Sedimentgesteine (1) wie auch für Gesteine magmatischen Ursprungs (2)



Abb. 25d: Ratio 5/6 kontrastverstärkt; Bei sehr ausgeglichenem Spektralverhalten der Lithologie treten Vegetationsflächen (Pfeile) deutlich hervor



Abb. 25e: Ratio 5/7 kontrastverstärkt; Stärkste Differenzierung der Vegetationsflächen (vergl. Abb. 52).



Abb. 25f: Ratio 6/7 kontrastverstärkt

Dadurch wird eine erheblich sicherere Beurteilung der spektralen Eigenschaften von unterschiedlichen Oberflächen, bezogen auf je zwei Kanäle, erreicht. Helle Grauwerte in einem Ratio-Bild lassen auf eine stärkere Reflexion der entsprechenden Oberflächen in dem Kanal schließen, der im Zähler steht, dunkle Grauwerte sind durch eine stärkere Reflexion der Oberflächen des im Nenner stehenden Kanals charakterisiert. Helle Grauwerte in einem Ratio, berechnet aus Kanal 4/5 (grün/rot) signalisieren höhere Reflexionsanteile im grünen Bereich des Spektrums oder, umgekehrt ausgedrückt, eine stärkere Absorption im roten Spektralbereich. Gleiches Reflexionsvermögen in beiden Kanälen führt zu mittleren Grautönen, unabhängig von der Stärke der Reflexion. Für die Verarbeitung der vier MSS-Kanäle von LANDSAT bieten sich mit Ausnahme inverser Operationen sechs verschiedene Kombinationsmöglichkeiten an (Abb. 25 a-f).

### 5.2.2. Hauptachsentransformation

Die Hauptachsentransformation (principal component) basiert auf der Berechnung der Kovarianz - bzw. deren normierter Form der Korrelationsmatrix. Mit ihrer Hilfe werden neue Variable (Eigenwerte) ermittelt, die Linearkombinationen der Ursprungsvariablen sind. Geometrisch bedeutet dies eine Drehung des Koordinatensystems in die Hauptachsen des durch die Korrelationsmatrix beschriebenen Hyperellipsoids. Die bereits angesprochenen, geringen spektralen Unterschiede der LANDSAT-MSS-Kanäle kommen in den Scattergrammen (Abb. 12) und der errechneten Korrelationsmatrix (Tab. 5) zum Ausdruck.

| MSS - Band | 4     | 5     | 6     | 7     |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 4          | 1.000 | 0.913 | 0.874 | 0.832 |
| 5          |       | 1.000 | 0.969 | 0.943 |
| 6          |       |       | 1.000 | 0.971 |
| 7          |       |       |       | 1.000 |

Tab. 5: Korrelationsmatrix der Juli-Aufzeichnung

Am stärksten korreliert sind die beiden Infrarot-Kanäle (6,7); am schwächsten korreliert sind Kanal 4 und 7. Dies bedeutet, daß die stärksten spektralen Unterschiede, bezogen auf den gesamten zur Berechnung ausgewählten Bildausschnitt, zwischen dem grünen und dem zweiten Infrarotkanal zu erwarten sind, wohingegen sich die Kanäle 6, 7 bzw. 5, 6 nur durch geringe Spektralunterschiede auszeichnen. Optisch verdeutlicht ist dies in den Ratiokombinationen der entsprechenden Kanäle (Abb. 25).

Aufbauend auf der Kovarianz - bzw. Korrelationsmatrix wird mittels der Eigenvektoren ein neuer Satz von Hauptkomponenten (Achsen) berechnet, die unkorreliert und nach abnehmender Varianz geordnet sind (Abb. 27, a, b, c). Die Eigenwerte (Tab. 6) zeigen den größten Anteil der Gesamtvarianz in der ersten Hauptkomponente (96 %). Der Varianzanteil der zweiten Hauptkomponente liegt um 2.5 %, die restliche Varianz von 1.5 % verteilt sich auf die Achsen 3 und 4.

| HK 1    | HK 2   | HK 3  | HK 4  |
|---------|--------|-------|-------|
| 759.211 | 19.764 | 6.262 | 4.728 |

Tab. 6: Eigenwerte der Juli-Aufzeichnung

Bezogen auf die Bildinhalte in einem zweidimensionalen Raum (Abb. 26) (Hauptachsenbildung aus zwei Kanälen) ist die Achse der größten Varianz (Hk1) eine gewichtete Summe der Albedo Unterschiede, die zweite senkrecht dazu liegende Achse (Hk2) eine gewichtete Differenz und zeigt die spektralen Variationen annähernd frei vom Einfluß der Albedo und unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen. Das hier schematisch dargestellte Scattergramm verdeutlicht die geringen spektralen Unterschiede zweier beliebiger MSS-Kanäle für vegetationsfreie Gesteinsoberflächen. Die berechneten Scattergramme sind in Abb.12 dargestellt.



Abb. 26: Für aride Gebiete typische Verteilung im zweidimensionalen Raum, mit Lage der 1. und 2. Hauptkomponente

### 5.2.3. Diskussion (mehrkanaliger Verfahren)

Der konventionellen Photointerpretation, die u. a. auf der Ansprache geringer Grau- bzw. Farbtonvariationen beruht, sind auf der Grundlage multispektraler Einzelaufnahmen Grenzen gesetzt. Ratio- und Hauptachsentransformationen ermöglichen die Beurteilung kombinierter Kanäle insbesondere deren Spektralvariationen. Dies ist ein wesentlicher Anwendungsbereich zur Nutzung multispektraler Aufzeichnungen.

Ratioverfahren können als Reduktionsverfahren gesehen werden. Durch die Division werden Albedo und Beleuchtungsunterschiede weitgehend unterdrückt; die spektralen Eigenschaften treten in den Vordergrund. Nachteile dieser Verarbeitung liegen in einer Verschlechterung des Signal/Rausch Verhältnisses und einer mitunter aufwendigen Erfassung des atmosphärischen Streulichtanteils in den einzelnen Kanälen. Ratioverarbeitungen werden im wesentlichen auf je zwei Kanäle angewendet, wodurch jedoch die Interpretation der Bildinhalte, bzw. der Rückschluß auf das spektrale Verhalten der abgebildeten Oberflächen erleichtert ist. Weiter ist dieses Verfahren unabhängig von den unterschiedlichen Reflexionswerten der aufgezeichneten Region verwendbar. Bei gleichen Beleuchtungsbedingungen und annähernd konstanten atmosphärischen Einflüssen sind benachbarte Szenen unter Beibehaltung der Verarbeitungsparameter direkt kompatibel. Auch Ratioverarbeitungen multitemporaler Aufzeichnungen mit unterschiedlichen Beleuchtungskonditionen und Streulichtanteilen sind abgesehen von variierenden Signal/Rausch Verhältnissen, durchaus vergleichbar.

Bei Hauptachsentransformationen können beliebig viele Kanäle (mindestens zwei) miteinander verknüpft werden. Eine Korrektur des Streulichts ist nicht erforderlich. Auf der Grundlage der Datenstatistik werden rechnerisch Wichtungsfaktoren ermittelt, die aus einer Anzahl  $N$  von Originalkanälen,  $N$  neue, linear transformierte, unkorrelierte Ergebnisbilder berechnen (Abb. 27 a, b, c zeigen die ersten 3 Hauptkomponentenbilder berechnet aus den 4 MSS-Kanälen). Die erste Hauptkomponente ist eine gewichtete Summe aus den verwendeten Ausgangskanälen und zeigt deren gemittelte Albedounterschiede. Sie weist im ungestreckten Originalzustand neben der höheren Varianz auch eine bessere Besetzungsdichte der Grauwertstufen gegenüber den Originalkanälen auf. Spektrale Unterschiede kommen nicht zum Tragen. Sie treten (im zweidimensionalen Merkmalsraum) in der senkrecht dazu liegenden, zweiten Hauptkomponente in den Vordergrund, wobei Beleuchtungs- und Albedo Differenzen eliminiert sind.

Die dritte Hauptkomponente zeigt die nächst geringeren Spektralvariationen aus allen vier MSS-Kanälen auf. Das Rauschen verkörpert in diesem Beispiel die geringsten "spektralen" Variationen. Es tritt in der vierten Hauptkomponente stark in den Vordergrund und ist hier nicht dargestellt.

Die Problematik der Hauptkomponentenbilder liegt darin, daß insbesondere die spektralen Variationen im Sinne des erfaßten Phänomens oft nicht interpretierbar sind, da jede Achse eine



Abb. 27a: Hauptkomponente I, kontrastverstärkt; abgebildet sind die gemittelten Albedovarianzen aller, zur Berechnung verwendeten Kanäle (4,5,6,7)



Abb. 27b: Hauptkomponente II, kontrastverstärkt; hervorgehoben sind die spektralen Eigenschaften entsprechend der zweitgrößten Varianz aller verwendeter Kanäle



Abb. 27c: Hauptkomponente III, kontrastverstärkt; hervorgehoben sind die spektralen Eigenschaften entsprechend der drittgrößten Varianz aller verwendeter Kanäle

lineare Kombination aller Eingabekanäle ist. Im Gegensatz zur Ratiotransformation ist sie mehr ein Mittel zur Unterscheidung bzw. Trennung und weniger ein Verfahren zur spektralen Identifizierung. Dies betrifft im wesentlichen drei- und mehrkanalige Transformationen, wo beispielsweise starke "Anomalien" in höheren Achsen oft keine Erklärung mehr finden können, wenn auch aus den Faktorladungen der Eigenvektoren der Einfluß einzelner Kanäle auf die Transformation ablesbar ist. Aus Tabelle 7 wird ersichtlich, daß die erste Hauptkomponente im wesentlichen durch die Faktorladungen der Kanäle 5, 6 und 7 bestimmt wird. Der geringere Einfluß von Kanal 4 auf die Albedoinformation kehrt sich in der zweiten und dritten Hauptkomponente um. HK2 wird bestimmt durch den Kontrast von Kanal 7 zu den sichtbaren Kanälen. Die Variationen in HK3 sind auf die gegensätzlichen Faktorladungen von 4,7 zu 5,6 zurückzuführen. Die vierte Hauptachse ergibt sich aus dem Gegensatz von Kanal 6 zu den Kanälen 5 und 7.

|         | Hk1   | Hk2    | Hk3    | Hk4    |
|---------|-------|--------|--------|--------|
| Kanal 4 | 0.250 | 0.630  | 0.713  | 0.176  |
| Kanal 5 | 0.565 | 0.456  | -0.480 | -0.490 |
| Kanal 6 | 0.557 | -0.137 | -0.265 | 0.774  |
| Kanal 7 | 0.553 | -0.612 | 0.435  | -0.358 |

Tab. 7: Eigenvektoren (Faktorladungen) der Juli Daten

Ein weiterer Gegensatz zu Ratiotransformationen besteht in der Nichtübertragbarkeit des Verfahrens auf benachbarte Szenen. Da jede Region unterschiedliche Bildinhalte aufweist, die Kovarianz also für jedes dieser Gebiete verschieden ist, weichen die Resultate, wenn auch oft nur geringfügig, voneinander ab. Zwar besteht die Möglichkeit, ein und dieselben Wichtungsfaktoren für die Transformation mehrerer benachbarter Szenen beizubehalten; der volle Umfang der Varianzen wird dabei jedoch nicht ausgeschöpft, was eine Minderung der Resultate mit sich bringt. Kauth & Thomas (1976) haben neben anderen eine Möglichkeit aufgezeigt, wie durch Rotation und Wichtung der Achsen eine multitemporale Beurteilung von Vegetationsflächen erreicht werden kann. Dieser Vorgang ist jedoch mit hohem Rechenaufwand verbunden und muß nicht zwingend zu befriedigenden Ergebnissen führen.

Abschließend sollte erwähnt werden, daß die erste Hauptachse nicht generell die Albedo, die zweite und dritte Hauptachse die spektralen Variationen von Oberflächen beinhalten muß. In Aufnahmen mit starker Vegetationsbedeckung, die sich gleichzeitig durch geringe Reliefenergie und hohen Sonnenstand auszeichnen, können die spektralen Unterschiede einiger Kanäle durchaus eine größere Varianz gegenüber der Albedo einnehmen.



Abb. 28a: Tag-IR Aufnahme des HCMR vom 18.5.1978, relativ geometrisch korrigiert zu Abb. 28b. Durch die starke Vergrößerung werden Pixelstruktur und das Abspielraster erkennbar



Abb. 28b: Nacht-IR Aufnahme des HCMR vom 16.6.1978  
Vergleiche Abb. 28a

Dies würde dazu führen, daß die spektralen Variationen in der ersten Hauptkomponente, die Albedoinformation in einer der höheren Achsen zu liegen kommt.

#### 5.2.4. ATI und $\Delta T$ Berechnungen der HCMM-Daten

Eine multispektrale Abtastung des thermalen Bereichs wird bislang nur von Flugzeugen aus, z. B. mit einem von Daedalus Enterprises Inc. entwickelten Scanner (TIMS) durchgeführt. Die Aufzeichnungen des HCMM dagegen liegen nur multitemporal als Tag-Nacht Infrarotaufzeichnungen, verteilt über mehrere Monate vor. Aus diesem Grunde und den bereits in Kapitel II 3.2./4.3. aufgezeigten Argumenten sowie der inhaltlich gegenüber LANDSAT MSS völlig verschiedenen Datensätze müssen bei den HCMM Aufzeichnungen andere Verarbeitungsmöglichkeiten in Betracht gezogen werden.

Dabei bieten sich Differenzbildungen ( $\Delta T$ ) und die Berechnung der thermalen Trägheit (ATI) an. Die Problematik der system- bzw. wetterbedingten Nichtverfügbarkeit aufeinanderfolgender Tag-Nacht Aufzeichnungen wurde bereits in Kap. II. 4.3 diskutiert; ebenso die unzulängliche Aussagekraft von  $\Delta T$  und ATI bei Kalkulationen mit zeitlich weit auseinanderliegenden Daten. Abb.28 a, b zeigen die kontrastverstärkten Tag- und Nachtaufnahmen vom 18.5.1978 bzw. 16.6.1978. Sie werden inhaltlich in Kap. V. diskutiert. Auf eine Diskussion der  $\Delta T$  und ATI Produkte wurde aus vorgenannten Gründen und der daraus resultierenden, nicht verbesserten Differenzierungsmöglichkeit verzichtet.

#### 5.3. Farbtransformationen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden bereits Begriffe wie Albedo und spektrale Eigenschaften verwendet. Mit Hilfe von Ratio- oder Hauptachsentransformationen ist die Möglichkeit gegeben, spektrale Eigenschaften, also Farbunterschiede, durch Grautonvariationen zu verdeutlichen und zu beschreiben, ohne daß die Farbe als solche wahrgenommen werden muß.

##### 5.3.1. Additive Falschfarbendarstellung

Die herkömmlichste Methode, Multispektralaufnahmen farblich darzustellen, ist die additive Farbmischung, bei der aus den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau (RGB) alle Farbtöne kombiniert werden können. Um ein Farbbild am Monitor oder auf Photopapier zu erzeugen, werden je drei kontrastverstärkte S/W-Diapositive mit je einem der RGB-Filter projiziert. Abb.29 zeigt ein Farbkomposite der Juli Aufzeichnung von MSS. Dem grünen Spektralauszug wurde die Farbe Blau zugeordnet, dem roten Spektralauszug die Farbe Grün und dem langwelligeren Infrarotspektralauszug die Farbe Rot. Da die zugeordneten Farben gegenüber den aufgezeichneten Spektralbanden zum kurzwelligen Bereich verschoben sind, spricht man auch von einem Farbinfrarot oder Falschfarbenbild.

Die Helligkeit oder Intensität der unterschiedlichen Oberflächen ergibt sich aus der Summe der reflektierten Strahlung in allen drei Wellenlängenbereichen und entspricht der Albedo.



Abb. 29: Falschfarbenbild aus MSS 4/5/7 (kodiert blau, grün, rot). Mit Ausnahme der rot erscheinenden Vegetationsflächen treten nur ungesättigte Farben auf.

Die verschiedenen Farbtöne ergeben sich aus den relativen Verhältnissen der wellenlängenspezifischen Intensitäten. Dies bedeutet, daß Gesteinsoberflächen mit unterschiedlicher Albedo durchaus gleiche spektrale Eigenschaften haben können. Die Sättigung der Farbe ist auf den Grad der Absorption bzw. Reflexion in den einzelnen Kanälen relativ zueinander zurückzuführen.

Das in Abb. 29 dargestellte Falschfarbenbild zeigt starke Helligkeitsunterschiede, jedoch nur geringe farbliche Nuancen. Der größte Teil der Bildinhalte könnte somit einem einzelnen S/W Spektralauszug entnommen werden. Die spektralen Unterschiede von Gesteinsoberflächen im sichtbaren und im nahen Infrarotbereich sind generell gering und im wesentlichen mit schwachen Absorptionsbanden von  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  zwischen  $0,4\text{--}0,6\text{ }\mu\text{m}$  bzw.  $0,8\text{--}1,0\text{ }\mu\text{m}$  assoziiert (Goetz & Rowan 1981 / Kahle, 1982 a). Im Gegensatz dazu zeigen Vegetationsflächen eine starke Chlorophyll Absorption zwischen  $0,5$  und  $0,7\text{ }\mu\text{m}$  und eine hohe Reflexion oberhalb  $0,7\text{ }\mu\text{m}$ , bedingt durch die Zellstruktur. Dies führt zu den einzig gesättigten Farben in Abb. 29. Vegetationsflächen, auch geringsten Ausmaßes, sind so aufgrund kräftiger roter Farben deutlich zu identifizieren.

Um eine verbesserte farbliche Differenzierung auch der feinen Spektralvariationen von Gesteinsoberflächen zu erreichen, bieten sich mehrere Möglichkeiten an. So würde beispielsweise eine additive Farbmischung aus bereits verarbeiteten Daten wie Ratio- oder Hauptachsenkomponenten sicher zu farblich besser differenzierbaren Produkten führen, da diese Eingabekanäle weit niedriger korreliert sind als die Originalkanäle von Abb. 29. Allerdings müßten erhebliche Nachteile in Kauf genommen werden. Einmal können, wie eine Reihe von Versuchen gezeigt hat, nur Daten mit gleichwertigem Informationsgehalt (z. B. Albedo- oder spektrale Informationen) miteinander kombiniert werden, um völlig verwirrende Abbildungen zu vermeiden, zum anderen ist auch dann ein Rückschluß auf die spektralen Eigenschaften der abgebildeten Oberflächen erschwert, wenn nicht unmöglich.

### 5.3.2. Transformationen nach Intensität, Farbfrequenz und Sättigung (IHS).

Die Grenzen, die der Kombination durch additive Farbmischung gesetzt sind, führen zurück auf eine Farbraumtransformation, die dem psychologischen Farbempfinden des menschlichen Auges Rechnung trägt. Dabei werden die Ausgangskanäle in ein Koordinatensystem transformiert, dessen Achsen Parameter darstellen, mit deren Hilfe die Farben üblicherweise beschrieben werden. Die Parameter werden Intensität (I), Farbfrequenz (engl. H von Hue) und Farbsättigung (S) genannt. Abb. 30 zeigt das CIE Chromatizitätsdiagramm. Die reinen Grundfarben für die additive (Rot, Grün, Blau) (R,G,B) und subtraktive Farbmischung (Gelb, Magenta, Cyan) (Y,M,C) liegen auf einem umgekehrt u-förmigen Graph, der alle für das menschliche Auge sichtbaren Farben umschließt. Das Dreieck innerhalb des Farbraums umschließt die Farben, die von einem Farbmonitor dargestellt werden können. Die unbunte Grundfarbe Weiß (W) liegt in der Mitte.

Für ein Objekt u ergibt sich die dominierende Wellenlänge s (Farbfrequenz) durch Verlängerung des Vektors Wu. Die Sättigung (Reinheit) der Farbe wird durch das Verhältnis  $uW$  zu  $sW$  bestimmt (Konecny, 1975). Das gemeinsame Kriterium aller in diesem zweidimensionalen CIE Raum dargestellten Farbnuancen ist, daß keine von ihnen verschwärzt ist, also in keiner Mengenteile der unbunten Grundfarbe Schwarz (S) vertreten sind (Küppers, 1980). Die dritte Dimension (Intensität) muß man sich als Strecke durch W senkrecht zu X und Y vorstellen, an deren Enden die unbunten Farben Weiß und Schwarz liegen. Eine verzerrte aber dennoch anschaulichere Farbraumdarstellung gibt Küppers (1980) am Beispiel einer Sechskant-Pyramide (Abb. 31). Die sechseckige Fläche mit den sieben reinen Grundfarben Weiß(W), Orangerot(O), Magenta(M), Violettblau(V), Cyan(C), Grün(G) und Gelb(Y) entspricht sinngemäß dem CIE Diagramm. Aus ihr lassen sich Farbfrequenz und Sättigung ableiten. Die Intensität ergibt sich aus der Verschwärtlichung der Farben nach S (unbunte Farbe Schwarz). Aus diesem Sachverhalt wird deutlich, daß jede beliebige Farbfrequenz durch Zumischen von Weiß in ihrer Sättigung und durch Zumischen von Schwarz in ihrer Intensität variiert werden kann.

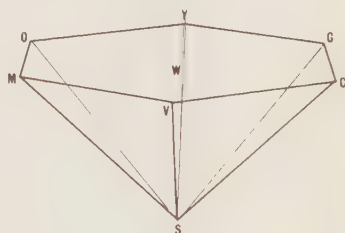
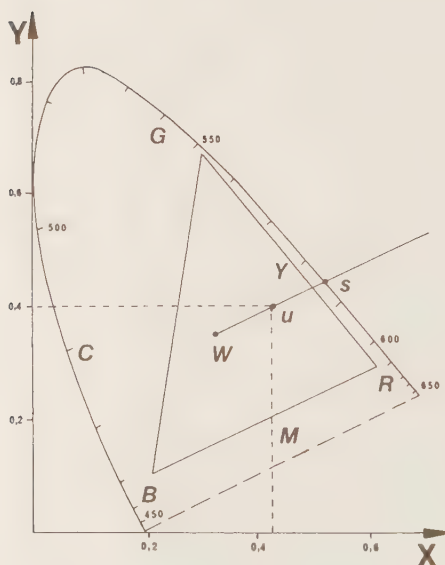


Abb.31: Farbpyramide nach Küppers (1980)

Abb.30: CIE Chromatizitätsdiagramm (Haydn et al., 1982a,b)

In den letzten Jahren wurden verschiedene Lösungsansätze zur Transformation nach IHS entwickelt. Die Basisformeln des Peripheriesystems "EARTHVIEW" sind dargestellt in Buchanan, (1979). Der am Institut implementierte, reversible Algorithmus ist beschrieben in Haydn et al. (1982 a), (1982 b). Der wesentliche Unterschied des IHS-Farbraums gegenüber dem RGB-Farbraum

liegt in der Unabhängigkeit der einzelnen Parameter. Damit ergeben sich nicht nur neue Möglichkeiten für eine gezielte und sinnvolle Kombination von Daten eines Sensors sondern auch von Multisensordaten. Die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten dieser Farbtransformation wurden von Haydn et al. (1982a,b,c) aufgezeigt.

Im folgenden werden an drei Verarbeitungsbeispielen die Möglichkeiten und Grenzen dieser Methoden aufgezeigt und diskutiert.

Wie schon früher erwähnt, sind LANDSAT-MSS Daten in bezug auf vegetationsfreie Oberflächen hoch korreliert und zeigen dementsprechend nur geringe Farbsättigungen. In diesem Zusammenhang sei nochmals darauf hingewiesen, daß die Korrelationsrechnung ein Maß für die Ausprägung relativer Remissionsunterschiede von Oberflächen in den Eingangskanälen ist. Jeweils auftretende Maxima und Minima (Farbfrequenzen), sowie die Gesamthelligkeit (Albedo, Intensität) werden dabei nicht berücksichtigt.

Um die Differenzierung von Gesteinsoberflächen zu verbessern, wurden aus den Eingangskanälen des Falschfarbenbildes von Abb. 29 zuerst die Intensitäts-, Farbfrequenz- und Sättigungsanteile nach folgendem Schema berechnet (Abb. 32).

|                       |   |                    |   |                    |
|-----------------------|---|--------------------|---|--------------------|
| (MSS-4) --) Blau (B). | ( | -----              | ) | . Intensität (I)   |
|                       | . | ( Transformation ) | . |                    |
| (MSS-5) --) Grün (G). | ( | -----              | ) | . Farbfrequenz (H) |
|                       | . | ( I H S )          | . |                    |
| (MSS-7) --) Rot (R).  | ( | -----              | ) | . Sättigung (S)    |

Abb. 32: Transformation von RGB nach IHS

Abb. 33 a, b, c zeigen die berechneten (zur Darstellung kontrastverstärkten) Intensitäts-, Farbfrequenz- und Sättigungsanteile aus den Eingangskanälen von MSS 4/5/7 der Juli Aufnahme. Die Intensitätskomponente (I) zeigt die Gesamthelligkeit, die Farbfrequenzkomponente (H) zeigt auftretende dominierende Wellenlängen in verschiedenen Grautönen, geordnet nach dem Spektralzug von Blau (dunkel) über Cyan, Grün, Gelb, Rot nach Magenta (hell). Die Farbsättigungskomponente bildet unterschiedliche Sättigungsanteile in verschiedenen Grautönen ab, die sich aus den Albedovariationen der Ausgangskanäle ergeben, wobei eine Zunahme der Sättigung durch den Anstieg der Helligkeit angezeigt wird.

Die Intensitätskomponente ist in ihrem Erscheinungsbild den hochkorrelierten Ausgangskanälen vergleichbar, als eigenständige Interpretationshilfe jedoch nur von geringer Bedeutung. Anders verhält es sich bei der Farbfrequenz- und der Sättigungskomponente. Beide für sich liefern nicht nur zusätzliche Informationen zur Differenzierung von Oberflächen, sie können in Verbindung mit Abb. 29 auch wesentlich zum Verständnis der



Abb. 33. Intensitätskomponente berechnet aus den Kanälen  
MSS 4/5/7 der Abbildung 29

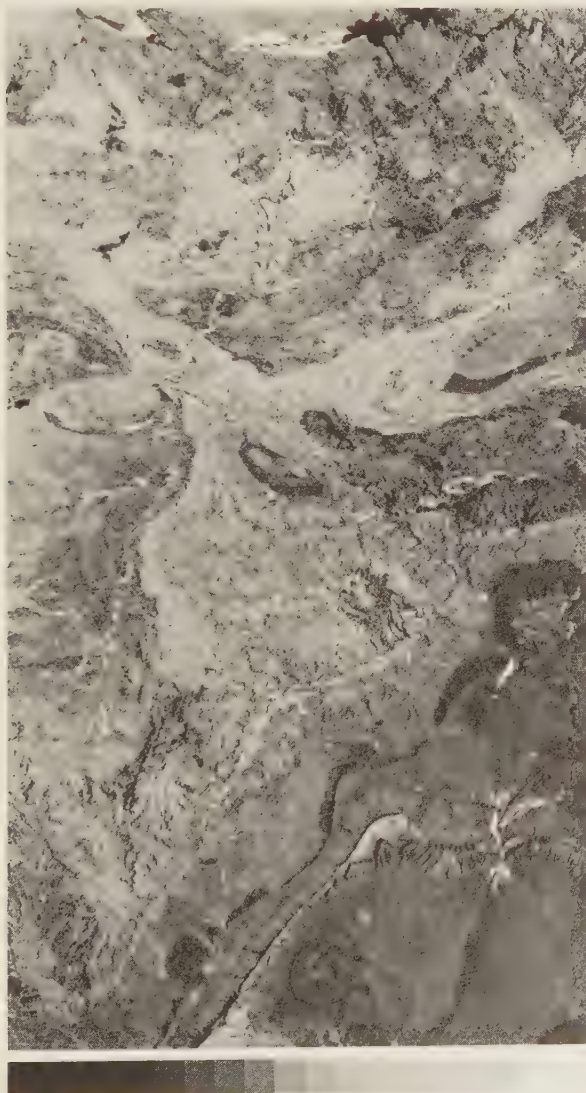


Abb. 33b: Farbfrequenzkomponente berechnet aus den Kanälen  
MSS 4/5/7 der Abbildung 29.



Abb. 33c: Farbsättigungskomponente berechnet aus den Kanälen  
MSS 4/5/7 der Abbildung 29.

Transformation nach IHS und zur Abschätzung ihrer Anteile beitragen. Die verbleibende, mehr oder weniger starke Ausprägung des Geländereiefs in beiden Farbkomponenten, ist auf den Einfluß des nicht ausreichend eliminierten Streulichts zurückzuführen.

Diese drei, voneinander unabhängigen Komponenten (I,H,S) können nun z.B. genutzt werden, um die Farbdarstellung von Abb.29 zu verbessern, d.h. die bereits enthaltenen farblichen Differenzierungen nach Helligkeit, Frequenz und Sättigung zu optimieren. Für einen solchen Ansatz bieten sich mehrere Möglichkeiten an, von denen jedoch nur wenige Varianten sinnvoll erscheinen.

Eine Änderung der Intensitätskomponente (Abb.33a) ist nicht angezeigt, da der Tonwertumfang der Albedo voll ausreichend ist, und auch im RGB-Raum variiert werden kann. Eine stärkere Differenzierung (z.B. durch eine größere Anzahl von Farbfrequenzen) könnte durch eine Modifizierung der Farbfrequenzkomponente (Abb.33b) mit Hilfe einer Streckung der Daten (Kontrastverstärkung) von 0 bis 255 erreicht werden. Diese Neuverteilung der Farbfrequenzen hätte jedoch zur Folge, daß ein Rückschluß auf das tatsächliche Spektralverhalten einzelner Oberflächen, d.h. auf den Frequenzbereich der stärksten Reflexion nicht mehr möglich wäre. Da diesem Rückschluß Vorrang gegenüber der Farbfrequenzaufspaltung einzuräumen ist, kann nur noch eine Änderung der Sättigungskomponente (Abb.33c) ins Auge gefaßt werden.

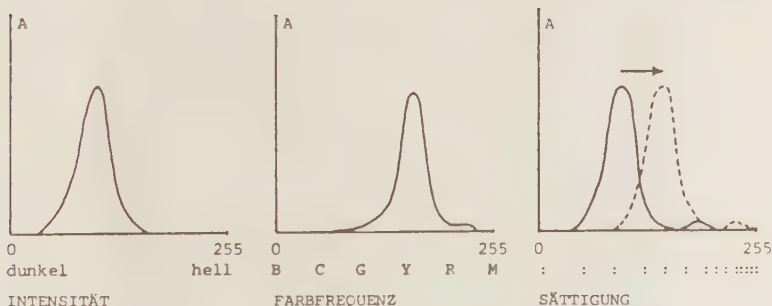


Abb. 34: Schematisierte Histogrammverteilung der IHS-Komponenten (A = Anzahl Grauwerte)

Wie bereits angemerkt, ist gerade die Sättigung in Abb.29, bedingt durch die hohe Korrelation der Ausgangskomponenten unbefriedigend und die Kartierung spektraler bzw. lithologischer Einheiten somit eingeschränkt. Eine Anhebung der Sättigung ohne Verlust der vorhandenen Abstufungen kann erreicht werden, indem das gesamte Grauwertintervall (Histogramm) dieser Komponente um einen empirischen Wert zur oberen Grenze (255) des festgelegten 8-bit Dynamikbereichs verschoben wird (Abb.34). Anschließend müssen aus den drei IHS-Komponenten,



Abb. 36: Falschfarbenbild der Juliaufzeichnung MSS 4/5/7 nach Transformation und Anhebung der Sättigungskomponente von Abb. 29

der unveränderten Intensitäts- und Farbfrequenzkomponente sowie der modifizierten Sättigungskomponente (Abb.34), drei neue Spektralauszüge (Rot, Grün, Blau) für die additive Weiterverarbeitung im Farblabor rücktransformiert werden (Abb.35). Das Ergebnis dieses Konzepts (Abb.36) zeigt nun exakt dieselben Intensitäts- und Farbfrequenzanteile wie Abb.29, jedoch mit stark angehobener Sättigung. Die sich daraus ergebenden Verbesserungen für die Photointerpretation sind klar ersichtlich.

|              |      |                    |           |         |
|--------------|------|--------------------|-----------|---------|
| Intensität   | (I). | (-----)            | .Blau (B) | Farb-   |
|              | .    | ( Transformation ) | .         | --)     |
| Farbfrequenz | (H)  | (-----)            | .Grün (G) | Monitor |
|              | .    | ( R G B )          | .         | --)     |
| Sättigung    | (S). | (-----)            | .Rot (R)  | Film-   |
|              |      |                    |           | ausgabe |

Abb. 35: Transformation von IHS nach RGB

Der reverse Algorithmus von IHS nach RGB, wie er für vorgenannte Rücktransformation verwendet wurde, bietet das größte Anwendungsspektrum zur Datenkombination. Er eröffnet die Möglichkeit, Originaldaten mit bereits verarbeiteten Daten oder Daten unterschiedlichen physikalischen Inhalts derselben Szene sinnvoll zu kombinieren, so daß Zusammenhänge verdeutlicht werden, und dennoch Rückschlüsse auf die Eingabekomponenten erhalten bleiben.

Abb.37 zeigt schematisch die Berechnung von 3 Spektralauszügen (RGB) aus vorverarbeiteten MSS-Daten. Als Intensitätskomponente wurde Kanal-7 gewählt, die Farbfrequenzen werden getragen von den Grautonabstufungen des Ratio 5/4 (Negativ von Abb. 25a), die Sättigungsabstufungen sind kontrolliert durch das Ratio 6/7 (Abb. 25f).

|           |     |   |   |                    |   |   |         |
|-----------|-----|---|---|--------------------|---|---|---------|
| MSS-7     | --) | I | . | (-----)            | . | B | Farb-   |
|           |     |   | . | ( Transformation ) | . |   | --)     |
| Ratio 5/4 | --) | H | . | (-----)            | . | G | monitor |
|           |     |   | . | ( R G B )          | . |   | --)     |
| Ratio 6/7 | --) | S | . | (-----)            | . | R | Film-   |
|           |     |   |   |                    |   |   | ausgabe |

Abb. 37: Transformation nach RGB mit vorverarbeiteten Daten



Abb. 38: Farbkompositum nach Intensität (I), Farbfrequenz (H) und Sättigung (S). I=MSS-7, H=Ratio 5/4, S=Ratio 6/7

Auswahl und Zuordnung der z.T. vorverarbeiteten Produkte basieren auf der Überlegung, Daten mit unterschiedlich ausgerichtetem Inhalt (Albedo oder spektrale Eigenschaften) den entsprechenden Eingabeparametern (Intensität oder Farbfrequenz und Sättigung) zuzuführen. MSS-Kanal 7 bietet sich aufgrund des geringsten Streulichteinflusses und damit besten Kontrastes für die Intensitätseingabe an. Farbfrequenz und Sättigung mit weiteren Originalkanälen zu belegen, vergleichbar der additiven Farbmischung, wäre nicht sinnvoll, da beide Parameter keine Albedokomponenten darstellen. Die Versuchsergebnisse solcher Kombinationen waren dementsprechend unbefriedigend. Aus dem Angebot an Daten spektralen Inhalts (Ratios, 2. und 3. Hauptkomponente) wurde aus Gründen der Übertragbarkeit Ratiodaten der Vorrang gegeben (Kap.II.5.2.3.). Die Auswahl der Ratios 5/4 und 6/7 für aride Gebiete erfolgte empirisch und kann für spezielle Aufgabenstellungen variiert werden (Haydn et al., 1982,b), (Haydn & Youssef, 1982,d).

Das Farbkomposite aus den berechneten drei (RGB) neuen S/W-Auszügen ist in Abb.38 dargestellt. Die Albedoinformation ist gegeben durch die Reflexionswerte von Kanal 7. Die Farbfrequenzinformation ist von Blau über Grün nach Rot streng korreliert mit steigenden Grauwerten (Intensitäten) des Ratios 5/4, ebenso wie zunehmende Sättigungsanteile mit steigenden Grauwerten des Ratios 6/7 positiv korreliert sind. Dies bedeutet, daß jeder Grauwert in den Eingabeprodukten eine strenge Zuordnung im Farbbild erfährt. Mit Hilfe z.B. eines interaktiven Rechners können aus jedem einzelnen, im Farbbild 3-dimensionalen Pixelwert die exakten entsprechenden Grauwerte der Eingabedaten ermittelt werden. Ebenso können aus dem Farbprodukt durch den umgekehrten Algorithmus (Abb.32) wieder die Originaldaten erzeugt werden.

Die gegenseitige Unabhängigkeit der Eingabeparameter eröffnet auch die Möglichkeit zur Kombination unterschiedlicher Datenträger (Haydn et al., 1982a,b). Dieser vielschichtige Anwendungsbereich soll an einem Beispiel demonstriert werden. Wie bereits festgestellt, haben die Thermaldaten des HCMR nur eine sehr geringe Bodenauflösung von 600 x 600 m<sup>2</sup> wodurch eine Orientierung aufgrund fehlender Reliefinformation erschwert ist. Andererseits liefern sie in Teilbereichen deutlichere Oberflächendifferenzierungen als z.B. die Landsat-MSS Daten. Da die HCMR-Aufzeichnungen als Tag/Nacht Zyklen, nicht aber multispektral vorliegen, und die kalkulierten ATI-Bilder nicht den Erwartungen entsprachen, lag der Versuch zur Kombination mit MSS-Daten nahe. Nachdem die Daten relativ geometrisch korrigiert waren, wurden die Eingabeparameter wie folgt festgelegt (Abb.39). Vergleichbar der Transformation nach Abb.37 wurde MSS-Kanal 7 als Intensitätseingabe bestimmt. Das Nacht-IR (Abb.28b) wurde auf die Farbfrequenz, das Tag-IR (Abb.28a) auf die Sättigung festgelegt.

Das Ergebnis ist in Abb.40 dargestellt. Wie bei der Transformation nach Abb.37 sind die Helligkeitsunterschiede durch die Reflexionswerte von MSS-Kanal 7 bestimmt. Steigende Temperaturwerte der Nachtaufnahme bilden sich in Farbfrequenzen von Magenta über Blau Grün nach Orangerot ab, zunehmende Tag



Abb. 40: Farbkomposite nach Intensität (I), Farbfrequenz (H) und Sättigung (S). I=MSS-7, H=Nacht-IR, S=Tag-IR (Ausschnitt aus Haydn et al. 1982a)

Temperaturwerte bilden sich in steigenden Sättigungsgraden ab. Die streng rechnerische Zuordnung erlaubt auch hier eine Rücktransformation zu den Ausgangsparametern.

|          |     |    |   |                |   |    |     |         |
|----------|-----|----|---|----------------|---|----|-----|---------|
| MSS-7    | --) | I. | ( |                | ) | .B |     | Farb-   |
|          |     |    | ( | Transformation | ) | .  | --) | monitor |
| Nacht-IR | --) | H  | ( |                | ) | .G |     |         |
|          |     |    | ( | R G B          | ) | .  | --) | Film-   |
| Tag-IR   | --) | S. | ( |                | ) | .R |     | ausgabe |

Abb. 39: Transformation nach RGB mit unterschiedlichen Datenträgern

### 5.3.3. Diskussion

Durch die additive bzw. subtraktive Filterung mit drei S/W Spektralausügen können alle Mischfarben erzeugt werden. Die Zuordnung der Auszüge zu den jeweiligen Filtern erfolgt dabei nach Konvention (Falschfarbenbild), kann aber auch beliebig durchgeführt werden. Der Informationsgehalt bleibt dabei erhalten, wenn auch die Farbfrequenzen wechseln. Ein Falschfarbenbild von LANDSAT-MSS bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Oberflächen durch ihre verschiedenen spektralen Signaturen zu erkennen und zu differenzieren. Der Vorteil liegt im wesentlichen in der Synopsis von drei Kanälen und in der Tatsache, daß das menschliche Auge weit mehr Farbtöne (man spricht in Größenordnungen von  $10^4$ - $10^5$ ) als S/W-Abstufungen unterscheiden kann. Dadurch ergeben sich ideale Bedingungen für die Kartierung spektraler bzw. lithologischer Einheiten. Für eine strukturgeologische Auswertung kann sie von Nutzen sein (Erfassung von Versatzbeträgen bei Störungen); für eine Lineamentkartierung ist sie weniger geeignet, da hier die Farben eher maskierend wirken, wobei Farbpapiere zudem ein geringeres Auflösungsvermögen gegenüber S/W Papieren aufweisen.

Trotz dieser positiven Aspekte können herkömmliche Farbmischungen von LANDSAT-MSS Kanälen aus ariden Gebieten nicht als befriedigend bezeichnet werden. Die pastellartigen, oft flauen Farben von Gesteinsoberflächen sind auf das Fehlen signifikanter Absorptions- bzw. Reflexionsbanden im Sichtbaren und im nahen Infrarot Bereich zurückzuführen. Um den Umfang des Farbempfindens auch unter diesen Voraussetzungen voll ausnutzen zu können, ist die Farbraumtransformation nach Intensität (I), Farbfrequenz (H) und Farbsättigung (S) bestens geeignet.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, daß der Spielraum zur Farbmanipulation bei der additiven oder subtraktiven Farbfilterung im Labor sehr beschränkt ist. So kann z.B. die Gesamthelligkeit durch Änderung der Belichtungszeit variiert werden. Nicht variiert werden können dagegen einzelne Farbfrequenzen und die Sättigung. Die Belichtungsänderung bei nur einem der drei Projektionsfilter hat immer eine Beeinflussung der beiden restlichen zur Folge. Im Gegensatz dazu können die nach I,H,S transformierten Komponenten unabhängig voneinander modifiziert werden. Dieser Vorgang muß rechnerisch erfolgen, ebenso wie die Rücktransformation zur Erstellung von drei neuen, zur Filterung für das Fachlabor geeigneten Auszügen.

Alle, in Kap.II.5.3.2. dargestellten, über I,H,S optimierten, bzw. neu geschaffenen Farbkompositen ermöglichen einen klaren Rückschluß auf die Eingabeparameter und damit auf das spektrale Verhalten der aufgezeichneten Oberflächen. Ebenso ist durch die Wahl der Eingabeparameter und den pixelweise (ohne Nachbarschaftsbeziehung) arbeitenden Algorithmus die Übertragbarkeit dieser Konzeptionen auf Nachbarmbereiche voll gewährleistet.

Die aus den Originalspektralauszügen berechneten I,H,S -Komponenten (Abb. 33a,b,c) können eigenständig zur Differenzierung von Bildinhalten genutzt werden. Vorrangig die H- und die S-Komponente ermöglichen den Rückschluß auf ihren anteiligen Einfluß auf die Farbdarstellung.

Die Transformation zur Verstärkung der Sättigung (Abb.36) kann in dieser Form praktisch ohne Verlust jeglicher Information, bei gleichzeitig stark verbesserten Differenzierungseigenschaften durchgeführt werden. Auch das Signal/Rausch Verhältnis verschlechtert sich nur unwesentlich. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens liegt in der problemlosen zusätzlichen Anwendung von Filtern (z.B. addierter High-Pass zur Optimierung strukturgeologischer Inhalte), da die hierbei auftretende spektrale Abschwächung (Kap.II.5.1.3.) durch eine zusätzliche Anhebung der Sättigung kompensiert werden kann. Andererseits ist ein Rückschluß auf alle drei spektralen Anteile, d.h. auf das Reflexionsverhalten einzelner Oberflächen, in allen verwendeten Ausgangsdaten in dieser, wie auch in den herkömmlichen Falschfarbenbildern nicht möglich.

Verschiedene Oberflächen unterscheiden sich in ihren Farben, weil sie aus dem eingestrahlten Sonnenlicht unterschiedliche Anteile absorbieren. Die Farbinformation selbst wird durch den, am geringsten absorbierten Anteil empfunden. Dies bedeutet, daß eine in Abb.36 z.B. grün erscheinende Gesteinsoberfläche ihr Reflexionsmaximum im grün codierten Spektralauszug hat, also im roten Bereich des Spektrums, während sie in den blau und rot codierten Auszügen, respektive im grünen und infraroten Bereich des Spektrums absorbiert. Läßt sich die Stärke des Reflexionsmaximums noch an der Sättigung des grünen Farbtons abschätzen, so ist eine Beurteilung der Reflexionsanteile in den blau und rot codierten Auszügen nicht möglich. Dies jedoch können wichtige Kriterien zur spektralen Bestimmung einer Gesteinsoberfläche sein. Auch wenn die, von LAND-

SAT-MSS aufgezeichneten Wellenlängenbereiche, Vegetation und Fe-haltige Gesteine ausgenommen, keine ausgeprägten Absorptionsbanden beinhalten, so gewinnt, im Hinblick auf zukünftige schmalbandige Systeme mit einer höheren Anzahl von Kanälen, die qualitative Beurteilung von Spektralkurven erheblich an Bedeutung.

Eine Konzeption, die diese Voraussetzungen erfüllt, wurde in Abb.37 vorgestellt. Da Ratiobilder inhaltlich das Spektralverhalten von Oberflächen in zwei Kanälen wiedergeben, bietet sich eine Kombination mit zwei Ratios an (z.B.  $H=5/4$ ,  $S=6/7$ ). Die, im wesentlichen für die Orientierung notwendige Albedoinformation wird mit Kanal 7 über die Intensitätskomponente eingebracht. Die Darstellung von Abb.38 bietet nicht nur eine gute farbliche Differenzierung von Gesteinsoberflächen, sondern ermöglicht auch eine umfassendere Beurteilung deren spektraler Eigenschaften. Zudem können inhaltlich mehr als drei Kanäle zur Eingabe verwendet werden.

Ein stark gesättigtes Grün einer Gesteinsoberfläche z.B. ist auf mittlere Werte im Ratio  $5/4$  und auf hohe Werte im Ratio  $6/7$  zurückzuführen (Grün liegt in der Mitte der verwendeten Farbskala von Blau nach Rot). Daraus kann auf eine vergleichbare Reflexion im grünen und roten Spektralbereich und auf eine höhere Reflexion im Kanal 6 gegenüber Kanal 7 im Infraroten geschlossen werden. Die Vegetation zeichnet sich durch eine höhere Reflexion von Kanal 7 gegenüber Kanal 6 und von Kanal 4 gegenüber Kanal 5 aus. Sie bildet sich also hier in ungesättigten Blautönen ab (Abb.38 Mitte oben). Je nach Datenangebot und Aufgabenstellung können die Ratios ausgetauscht werden. Nachteile dieses Konzepts liegen in einer Verschlechterung des Signal/Rausch Verhältnisses (durch Verwendung von Ratios), in der für den Photointerpreten ungewohnten Art der Darstellung und in einer zum Teil erschwerten optischen Differenzierung von Intensität und Sättigung. Zudem ist sie für eine strukturgeologisch orientierte Auswertung weniger geeignet.

Abb.40 zeigt das Ergebnis einer zu Abb.37 vergleichbaren Konzeption. Der wesentliche Vorteil liegt in der Zusammenschau von Reflexions- und Emissionsdaten. Die kombinierte und dennoch in der optischen Darstellung voneinander unabhängige Abbildung einer Tag- und einer Nachtaufnahme vor dem Hintergrund eines relativ hochauflösenden MSS Kanals verbessert die Ansprache der Thermaldaten und ihren Bezug zum Geländerelief erheblich. Simulationsversuche haben gezeigt, daß sich Auflösungsunterschiede der Eingabekomponenten bei Verwendung eines hochauflösenden Intensitätsparameters nur gering auf den Interpretationsvorgang auswirken (Haydn et al., 1982a,b).

#### 5.4. Natürliches - und synthetisches Stereo

Beobachtungswinkel und Beleuchtungsverhältnisse sind neben den, von der Schwerkraft geprägten Ablagerungsformen bzw. Entwässerungsbedingungen die hauptsächlichsten Kriterien, die zu einer Abschätzung der räumlichen Verhältnisse auf monoskopie-

schen Satellitenbilddarstellungen herangezogen werden können. Insbesondere für tektonische Fragestellungen, also für strukturgeologische Auswertungen ist die räumliche Stellung unterscheidbarer Serien zueinander von grundlegender Bedeutung. Die Möglichkeit, die Erdoberfläche aus dem Weltraum synoptisch, in drei Dimensionen beobachten zu können, würde zwingend zu einer entscheidenden Reduzierung von Unsicherheitsfaktoren und zu einer Verbesserung der Interpretationsgenauigkeit führen. Neben der qualitativen Beurteilung würde auch die quantitative Auswertung wieder in den Vordergrund rücken.

LANDSAT-MSS liefert ein natürliches, wenn auch begrenztes Angebot an stereoskopisch auswertbarem Bildmaterial. Im Gegensatz zu flächenhaft abbildenden Aufnahmesystemen mit einem Perspektivitätszentrum bilden die multispektralen Scanner der LANDSAT Orbiter linienhaft ab, wobei jede Scanlinie ein Perspektivitätszentrum besitzt. Sich innerhalb einer Bahnspur überlappende Bereiche scannender Systeme, die zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden, sind lediglich Duplikate, da das stets im Nadir aufzeichnende System in Bewegungsrichtung keine Parallaxe erzeugt, die einen stereoskopischen Effekt ermöglichen würde.

Seitlich überlappende Gebiete aufeinanderfolgender Aufnahme-streifen (Abb. 13) können jedoch für eine stereoskopische Auswertung genutzt werden. Diese mehr oder weniger ausgedehnten Zonen bleiben jedoch immer auf dieselben geographischen Koordinaten fixiert, da die Umlaufzeiten des Satelliten mit der Erddrehung so abgestimmt sind, daß der 18-Tage Zyklus der Bahnspuren deckungsgleich bleibt.

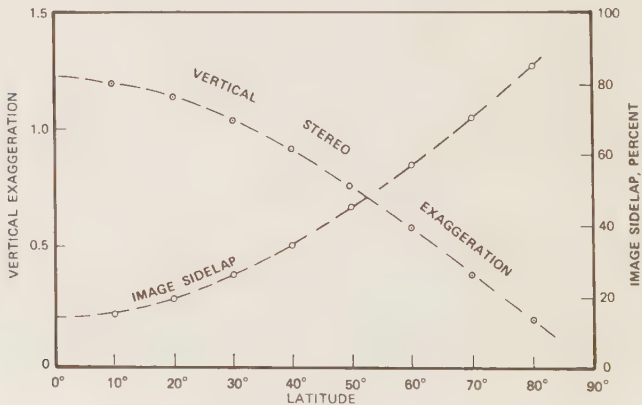


Abb.41: Bildüberlappung und vertikale Überhöhung von LANDSAT Stereobereichen als Funktion der geographischen Breite (Sabins, 1978)

Das stereoskopisch auswertbare Material ist vom Ausmaß des Überlappungsbereiches und dieser wiederum vom Breitengrad abhängig. Wie Abb. 41 zeigt, reicht die seitliche Überdeckung von 14% am Äquator bis zu 85% bei 80° nördlicher und südlicher Breite. Mit steigender Überlappung nimmt die Bildbasis, damit das Verhältnis Bildbasis zu Flughöhe und letztlich die vertikale Überhöhung ab. Der Überhöhungsfaktor kann den Wert 1.3 nicht überschreiten. Bei Luftbildern liegt er vergleichsweise bei ca. 4.0.

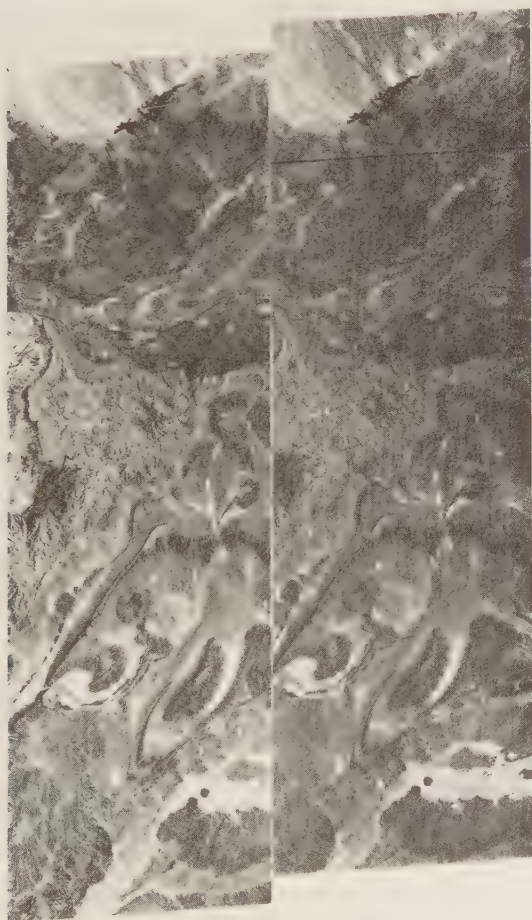


Abb. 42: Natürliches Stereopaar aus dem Überlappungsbereich zweier angrenzender Bahnspuren (216-217/39 Juli)

Das Testgebiet liegt um  $31^{\circ}$  nördlicher Breite. Daraus ergibt sich eine Überlappung von 26% ( $\approx 48$  km), eine Bildbasis von 137 km ( $185 - 48$  km) und ein Basis/Höhen Verhältnis von 0.149 ( $137/917$  km). Der vertikale Überhöhungsfaktor ergibt sich zu 1.04. Abb. 48 zeigt den stereoskopisch auswertbaren Bereich zweier benachbarter, an aufeinanderfolgenden Tagen im Juli aufgenommenen Szenen.



Abb. 48) Synthetischer Stereoeffekt, erzeugt durch Steigerung der Parallaxe mit Tag 18 Daten von Abb. 26. Steigende Temperaturen ergeben niedrigere Höhenlagen. (Haydn et al., 1982a)

Die Vorteile stereoskopischer Betrachtungsweise für die Verbesserung und Quantifizierung photogeologischer Auswertungen ist in Abb. 42 angedeutet, kann aber auch anhand von Luftbildern und neuerdings an photographischen Aufnahmen der METRIC CAMERA aus dem All demonstriert werden. Die zu geringe Bodenauflösung und die fehlende Überhöhung bei überlappenden MSS Aufzeichnungen vermitteln nur einen schwachen Eindruck vom Oberflächenrelief. Dennoch können solch schmale Überlappungsbereiche zu einer sichereren strukturgeologischen Kartierung beitragen, insbesondere dann, wenn lineare Elemente (Lineamente, Störungen) sich nicht durch vorgegebene Beleuchtungsverhältnisse (Licht/Schatten) sondern durch weitgespanntere morphologische Variationen auszeichnen.

Um einen künstlichen Stereoeffekt in vorhandene Satellitenbilder einbringen zu können, müssen sowohl die Bilddaten als auch die einzurechnenden Datenträger in digitaler Form vorliegen. Als Daten für die 3-D Information kommen digitale Geländemodelle, thematische Karten sowie digital vorliegendes Bildmaterial von Flugzeug oder Satellitenscannern in Frage. Die zur räumlichen Darstellung notwendige, künstliche Parallaxe für eine Satellitenbildszene wird berechnet, indem gleiche Bildpunkte längs der Scanlinien um einen bestimmten Betrag gegeneinander versetzt werden, wodurch zwei neue Bilder entstehen. Der jeweilige Versatzbetrag, also die Größe der Parallaxe, geht als Funktion des entsprechenden Grauwerts eines beliebigen Datenträgers ein (Haydn et al. 1982a).

Im vorliegenden Beispiel (Abb. 43) ist annähernd derselbe Szenenausschnitt wie in Abb. 42 zu sehen. Der räumliche Effekt ist durch die Tag-Emissionswerte (Abb. 28a) des HCMR-Scanners gesteuert. Je stärker die Emission der entsprechenden Oberfläche, desto niedriger ihre "topographische" Lage. D.h., jede Höhenlage repräsentiert einen bestimmten Emissionswert und keine Geländemorphologie. Der synthetisch berechenbare Stereoeffekt ist somit als Möglichkeit zu sehen, eine zusätzliche räumliche Informationskomponente zur Verdeutlichung physikalischer Parameter, hier der gesteinspezifischen Emissionswerte, einzuführen. Der thermale Höhengradient ist in Abb. 43 nicht berücksichtigt da, wie bereits früher erwähnt, am Institut noch keine Möglichkeit besteht ein topographisches Höhenmodell mit einzubeziehen.

## 6. Kriterien für die Datenumsetzung auf photographisches Papier

Photographische Negativ-Schichten sowie Diapositiv-Emulsionen können Objektkontraste bis 1:1000 und mehr in korrekte Schwärzungsabstufungen umsetzen (Mutter, 1965). Das Kontrastwiedergabevermögen photographischer Papiere ist dagegen sehr beschränkt. Der maximal erreichbare Kontrast des Aufsichtbildes ist durch die Helligkeit des reinen Papieruntergrundes und die größtmögliche Schwärzung durch das entwickelte Silber gegeben; eine Spanne, die im günstigsten Falle das Verhältnis von etwa 1:40 aufweist. Aus diesen Gegebenheiten heraus ist es verständlich, daß nur dann alle Schwärzungsabstufungen des Negativs auf die Kopie übertragen werden können, wenn der Schwär-

zungsumfang des Negativs nicht größer als der Kopierumfang des Positiv-Papieres ist. Eine übersichtliche Zusammenstellung zum photographischen Prozess, zur Sensitometrie und Auflösung photographischer Bilder gibt Konecny (1975).

Ein Papierabzug kann aber in keinem Falle die Tonwertabstufungen einer Negativ-Emulsion abbilden wenn die Ausgangsdaten bis zu max. 64 besetzte Graustufen enthalten. Auch wenn das menschliche Auge nur ca. 30 Graustufen (je Adaptionseinstellung) unterscheiden kann, ist bei S/W Abbildungen eine Auswertung von Diapositiven oder am Bildschirm (z.b eines interaktiven Rechners) vorzuziehen. Bei der Abspielung von Negativen über den Film-Scanner muß berücksichtigt werden, daß über den relevanten Datenbereich hinaus zusätzlich Spielraum bei der Kontrastverstärkung geschaffen wird, da sonst beim Positivprozeß die Bilder auch auf "weichster" Gradation in den Extremwerten zulaufen und somit die Bearbeitungsmöglichkeiten eingeschränkt sind. Bei der Abspielung von SW-Diapositiv Spektralauszügen, wie sie für die additive Farbmischung im Photolabor Verwendung finden, muß dagegen auf optimale Streckung der Daten (Kontrastverstärkung) geachtet werden. Je kontrastreicher die einzelnen Spektralauszüge sind, desto gesättigtere Farben erscheinen im Diapositiv und letztlich auf dem Farbpapier.

Um eine optimale Interpretationsvorlage mit möglichst geringem Verlust an Tonwertumfang zu schaffen, müssen für den S/W-Prozeß weiche Negative, für den Farbprozeß harte (kontrastreiche) Negative bzw. Positive angestrebt werden.

### 1. Einführung

Der bereits mehrfach verarbeitete, für eine beispielhafte Auswertung und Interpretation gewählte Ausschnitt, ist ein Teilbereich der Szenen 216-217/39 mit einer Pixelanzahl von 1420 Spalten mal 1120 Zeilen und entspricht damit ungefähr dem sechsten Teil einer ganzen LANDSAT Szene. Er zeigt große geologische Vielfalt, befindet sich im Überlappungsbereich der beiden Szenen und liegt auch multitemporal vor. Die Auswertung erfolgte aus Gründen der Objektivität für den methodischen Ansatz vor der Geländebegehung, auf der Basis der verarbeiteten Bildprodukte, gegliedert nach spektralen Gesichtspunkten und strukturgeologischen Inhalten. Eine mehr phänologisch orientierte Auswertung, wie sie z.B. auf Luftbildern durchgeführt werden kann, muß aufgrund der zu niedrigen Bodenauflösung in den Hintergrund treten.

Die Auswertung wurde auf mehreren Produkten in Folge durchgeführt. Als Grundlage dienten, wegen der geringen Bodenpixelgröße, verarbeitete LANDSAT-MSS Daten. Die Aufzeichnungen des Thermalscanners wurden als Zusatzinformation mit einbezogen. Grundsätzlich wurden alle, mit Hilfe der Datenverarbeitung verdeutlichten lithologischen und strukturgeologischen Phänomene, geordnet nach ihrer Thematik in die einzelnen Karten übertragen. In Kap.V.6./7. werden die in den Karten und im Gelände erfaßten Einheiten korreliert und diskutiert.

### 2. Erstellung thematischer Karten

Die Kartierung wurde im Maßstab 1:200 000 durchgeführt. Für geologische Fragestellungen sind Kartierungen von LANDSAT-MSS Produkten bis 1:200 000 vertretbar. Andere Disziplinen stellen z.T. höhere Anforderungen an die Genauigkeit und Identifikation von Objekten und müssen auf kleinere Maßstäbe zurückgehen. Eine übersichtliche Zusammenstellung zu dieser Thematik geben Gierloff-Emden & Wienecke (1978), Konecny (1975).

#### 2.1. Gewässernetz und Vegetationsverteilung

Gewässernetz und Vegetation sind in ariden Gebieten eng miteinander verknüpft und folglich in einer gemeinsamen Karte dargestellt (Abb.44). Mit eingetragen sind die Grenzlinien verschiedener oberirdischer Entwässerungssysteme und die Stauseen bei Quarzazate bzw. östlich von Tazenakht (Abb. 1). Zur Auswertung wurden vorrangig je ein High-Pass verstärkter Kanal 7 vom Juli und November sowie das Farbkomposite der Abbildung 36 herangezogen. Thermalaufzeichnungen fanden keine Verwendung.

#### 2.2. Lineamentkarte

Die Lineamentkartierung (Abb.45) wurde streng nach der Definition von O'Leary et al. 1976 durchgeführt. "Ein Lineament ist ein kartierbares, einfaches oder zusammengesetztes lineares Merkmal einer Oberfläche, dessen Komponenten geradlinig oder schwach gekrümmt angeordnet sind und welches sich deutlich von der Anordnung angrenzender Merkmale unterscheidet und anschei-

nend ein unter der Erdoberfläche liegendes Phänomen durchpaust". Nach dieser Definition bleiben die oft geforderten Angaben nach Herkunft, Ausdehnung und genetischem Inhalt offen. Einen sehr guten Überblick zu dieser, nach wie vor hart diskutierten Begriffs- und Aussageproblematik (Wise, 1977) gibt Jaskolla, (1978). Zur Erstellung dieser Karte wurde ausschließlich multitemporales MSS S/W-Material, kontrastverstärkter (gestreckter und gefilterter) Infrarotkanäle verwendet.

### 2.3. Strukturkarte

In dieser thematischen Karte sind unterschiedliche strukturgeologische Kategorien dargestellt (Abb.46). Die Höhenangaben sind der geologischen Karte No.70 Blatt Ouarzazate, Maßstab 1 : 500 000 entnommen. Soweit erfaßbar, sind auch anthropogene Objekte wie Straßen und die Rollbahn bei Ouarzazate eingezeichnet. Zur Erstellung dieser Karte war Datenmaterial, optimiert nach Albedodifferenzen und nach spektralen Gesichtspunkten erforderlich. Auch der stereoskopisch verfügbare Ausschnitt wurde zur Auswertung hinzugezogen.

### 2.4. Signaturkarte

Die Auswertung (Abb.47) unterschiedlicher photogeologischer bzw. lithologischer Einheiten (siehe Kap.V.2/3) ist im wesentlichen auf Variationen der Albedo und der spektralen Eigenschaften zurückzuführen. Die Textur spielt in diesem feingliederten Bereich bei der vorgegebenen Auflösung nur eine untergeordnete Rolle. Die Abkürzungen der photogeologischen Einheiten sind zur besseren Korrelation mit den stratigraphischen der geologischen Karte No. 138 Blatt Ouarzazate, Maßstab 1 : 200 000 entnommen (Abb.47a). Sedimentgesteine sind schraffiert, Gesteine magmatischen Ursprungs sind durch Einzelsymbole dargestellt. Die Richtung der Schraffur bezieht sich auf zeitlich unterschiedliche Formationen bzw. Abteilungen; die Art der Schraffur, zusätzliche Symbole und modifizierte Symbole charakterisieren den Gesteinstyp. Für die Erstellung der Signaturkarte fanden neben Farbkompositen, Ratios und Hauptachsenbildern auch die Thermaldaten Verwendung. Die Buchstaben und Zahlenreihe am Kartenrand dient neben Abb. 1 zur Orientierung für die Diskussion in Kap. V.7.



Abb.47a: Ausschnitt der geologischen Karte Ouarzazate (Nr.138) Originalmaßstab 1:200 000

# GEWÄSSERNETZKARTE / VEGETATIONSVERTEILUNG

LANDSAT MSS 216-217/39 78

WASSERLAUF



FLUVIATILE EROSIONSFORM



WASSERSCHIED

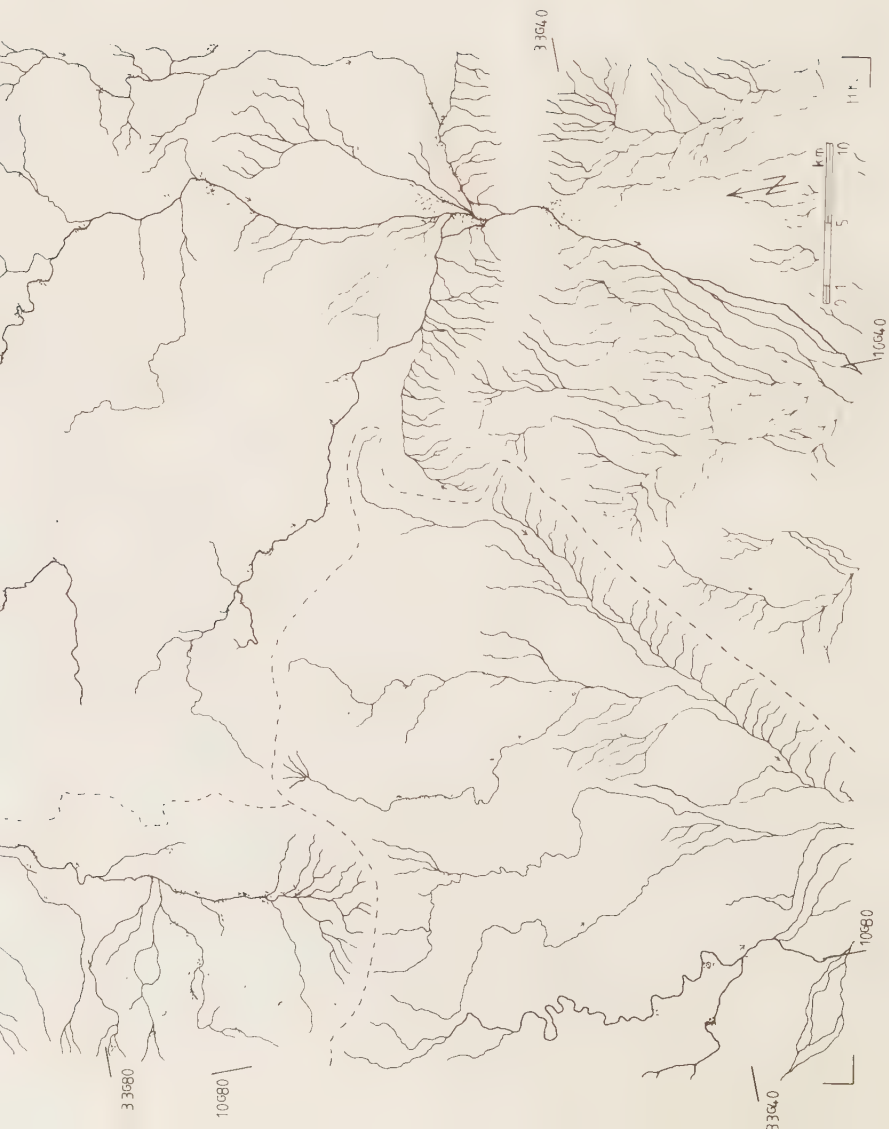


WASSERFLÄCHE



VEGETATION





10600

10600

## STRUKTURKARTE

LANDSAT MSS 216-217/39 78

- ◆ SATTELACHSE
- ✖ MULDENACHSE
- GELANDE STUFE
- ~ SCHICHTKOPF  
mit FALLRICHTUNG
- STÖRUNG  
mit BEWEGUNGSSINN
- ✖ AUFWÖLBUNG
- SCHUTT-, SCHWEMM-  
FÄLTER
- ..... AUTOPISTE
- ROLLBAHN
- 1401 HÖHENANGABE

34620

10600

33680

1560

34620



IV. Gelände-, Labor- und spektrale Daten

Unter Anwendung verschiedener Bildverarbeitungsalgorithmen konnten Vorlagen geschaffen werden, die zur Auswertung nach photogeologischen Kriterien herangezogen wurden. Die dabei angefertigten thematischen Karten bildeten, in Verbindung mit topographischen und geologischen Karten unterschiedlicher Maßstäbe, die Basis für eine punktuelle Beprobung im Rahmen der Geländearbeit.

1. Einführung

Um den folgenden Vergleich der Satellitenbilddauswertung mit dem vorhandenen Kartenmaterial, der Literatur und den Geländedaten zu erleichtern, wurden die ausgehaltenen photogeologischen Einheiten auf der Signaturkarte mit den Abkürzungen der korrelierenden stratigraphischen Formationen (Blatt Ouarzazate Maßstab 1 : 200 000) versehen und zeitlich geordnet.

In Anlehnung an die Sensorcharakteristiken und die damit verbundenen Möglichkeiten treten für die Gesteinsbeschreibung einige Kriterien mehr in den Vordergrund (Oberflächeneigenschaften, Dichte, Porosität), andere können vernachlässigt werden (Fossilbestand, lokale Besonderheiten). Petrofazielle Einheiten werden nur dann näher beschrieben, wenn ihre flächenhafte Erstreckung in einem verträglichen Verhältnis zur räumlichen Auflösung des Sensors steht.

Der Mineral- und Modalbestand der untersuchten Gesteinsproben wurde aus Dünnschliffen und mit Hilfe eines Röntgendiffraktometers ermittelt. Die nach der Flächenintegralformel vorgenommene halbquantitative Auswertung stellt keinen absoluten Volumenanteil dar. Geht man von gleicher Präparation und Vorbehandlung aller Proben aus, dürften die Relationen zwischen verschiedenen Mineralanteilen jedoch aussagekräftig sein (Rösch, 1968).

|      |              |        |               |      |            |
|------|--------------|--------|---------------|------|------------|
| Q    | = Quarz      | Bio    | = Biotit      | Ma   | = Magnetit |
| Plg  | = Plagioklas | Chl    | = Chlorit     | Py   | = Pyroxen  |
| Ab   | = Albit      | Mu     | = Muskovit    | Amph | = Amphibol |
| Or   | = Orthoklas  | Ser    | = Sericit     | Ol   | = Olivin   |
| Mkln | = Mikroklin  | Hellgl | = Hellglimmer |      |            |
| Ca   | = Calcit     | Cor    | = Cordierit   |      |            |
| Dolo | = Dolomit    | Hem    | = Hämatit     |      |            |

Die Ergebnisse beider Verfahren sind durchaus vergleichbar. Bei stärkeren Abweichungen wurde der Dünnschliffanalyse Vorrang gegeben. Insgesamt wurden ca. 5 Proben je ausgehaltener photogeologischer Einheit, verteilt über das Testgebiet genommen und deren Daten ermittelt. ● markieren die Beprobungspunkte in der Signaturkarte.

Dichte und offener Porenraum der Gesteinsproben wurden mit einem Luftvergleichspyknometer und einer hydrostatischen Waage bestimmt. Aus verschiedenen Proben desselben Gesteins wurde schließlich ein Mittelwert gebildet, der dann in die Tabelle eingeht.

Die Farbbestimmung wurde mit Hilfe einer von MUNSEL (1954) entwickelten Farbkollektion durchgeführt. Jede Farbe ist dabei durch ihre 3 voneinander unabhängigen Variablen (Farbfrequenz, Intensität, Sättigung), festgelegt und somit standardisiert (Norm). Bei farblich sehr inhomogenen Gesteinen wurde ein Farbfrequenzmittelwert über die pulverisierte Form ermittelt und die Intensität bzw. Sättigung abgeschätzt. Die Nomenklatur beinhaltet einen Farbnamen (engl.) sowie einen kombinierten Zahlen- und Buchstabenwert, wobei die erste Kombination z.B. 5 YR die Frequenz und die beiden folgenden einstelligen Zahlen die Intensität und Sättigung angeben. Die Bestimmungen wurden sowohl für den frischen Bruch als auch für verwitterte Gesteinsoberflächen ohne Berücksichtigung starker Krustenbildungen durchgeführt.

Die Oberflächenbeschaffenheit von Gesteinen stellt einen der wesentlichen Punkte der Bodenkontrolle dar. Bei einer Eindringtiefe der vom LANDSAT-MSS detektierten elektromagnetischen Strahlung von ca.  $\lambda/2$  kommt es durch Verwitterungsgrus, Krustenbildungen und spärlicher Vegetation zu starken Farbverschiebungen gegenüber frisch angeschlagenen Gesteinen. Ebenso verändern schon geringmächtige Auflagen von Lockermaterialien den Wärmehaushalt und damit die Absorptions- und Abstrahlungseigenschaften von anstehenden Gesteinen für den Bereich des thermalen Infrarot (Eindringtiefe im cm Ber.). Der Vergleich von Sensorsignal mit Geländedaten ist somit in hohem Maße von der Beurteilung weiträumiger Oberflächen abhängig.

## 2. Stratigraphische Gliederung

Die von Choubert (1952, 1963) vorgelegten Arbeiten dienten als Grundlage für die stratigraphische Einordnung der photogeologisch ausgehaltenen und beprobten lithologischen Einheiten. Umstritten ist dabei die Anzahl und absolute zeitliche Stellung der präkambrischen Orogenesen und die zeitliche Einordnung der Sedimente des Infrakambriums (Leblanc 1973). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann auf diese Diskussion nicht näher eingegangen werden. In vielen Fällen sind aus dem Satellitenbild zwar relative zeitliche Zuordnungen erfaßbar, eine absolute Altersstellung jedoch ist nicht möglich. Tabelle 8 gibt einen Überblick zur stratigraphischen Gliederung der im Arbeitsgebiet auftretenden Einheiten.

## 3. Tabellarische Zusammenfassung

Aus Gründen der Übersicht und des direkten Vergleichs wurden die, mit den in Kap II.4. vorgestellten Methoden ermittelten, multitemporalen spektralen Merkmale in die Tabellen mit aufgenommen.

In der linken Hälfte der Diagramme sind die mittleren Intensitäten (Grauwerte) der vier LANDSAT-MSS Kanäle von Juli (J) und November (N) aufgetragen, in der rechten Hälfte die Intensitäten multitemporaler Tag- bzw. Nachtemissionsaufzeichnungen des HCMR. Die Buchstaben a-n beziehen sich auf die in Tabelle 1. aufgelisteten Aufnahmezeitpunkte.

| FORMATION<br>Stufe | SCHICHTBEZEICHNUNG               | PHOTOGEOL.<br>EINHEIT |
|--------------------|----------------------------------|-----------------------|
| DEVONIEN           | :                                | di, dm, ds            |
| SILUR              | : Schistes Graptolites           | si                    |
| Ashgill            | : Deuxieme Bani                  | or6b                  |
|                    | : Ktaoua superieur               | or6a                  |
| Caradoc            | : Ktaoua inferieur               | or5a, or5b            |
| Llandeilo          | : Premier Bani                   | or4                   |
| Llanvirn           | : Tachilla                       | or3                   |
| Arenig             | : Fezouata superieur, Zini       | or1-2                 |
| Tremadoc           | : Fezouata inferieur             |                       |
| ACADIEN =          | : Gres du Tabanit                | ks2                   |
| M-KAMBRIUM         | : Schistes a Paradoxides         | ks1                   |
|                    | : Niveau d'Ourmast (B. Micmacca) | ks1a                  |
| GEORGIEN =         | : Gres terminaux                 | ki3                   |
| U-KAMBRIUM         | : Complex schisteux              | ki2                   |
|                    | : Serie schisto-calcaire         | ki1                   |
|                    | : Calcares de base               |                       |
|                    | : Serie des calcaires superieurs | Ad3                   |
| ADOUDOUNIEN =      | : Serie lie-de-vin (Gres Tikirt) | Ad2                   |
| INFRAKAMBRIUM      | : Serie des calcaires inferieurs | Ad1                   |
|                    | : Serie de base                  | Ad1a                  |
|                    | : Serie d'Ouarzazate             | III                   |
| PRAKAMBRIUM        | :                                | II                    |
|                    | :                                | I                     |

Tab. 8: Stratigraphische Gliederung des Arbeitsgebietes nach Choubert (1952, 1963) und Destombes (1962, 1963, 1970)

PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT:  $\gamma$ I GESTEINSTYP: Granit

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Präkambrium I

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 32, Or 24, Plg (Ab 22) 33,  
Nebengemengteile Py 5, Mu 3, Ser 2

|                              |                   |
|------------------------------|-------------------|
| - FARBE                      | 10 R 6/4 pale red |
| - BANKUNG                    |                   |
| - KÖRNIGKEIT/SORTIERUNG      | grobkörnig        |
| - DICHT (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.56              |
| - POROSITÄT (offene) (Vol%)  | 1.34              |

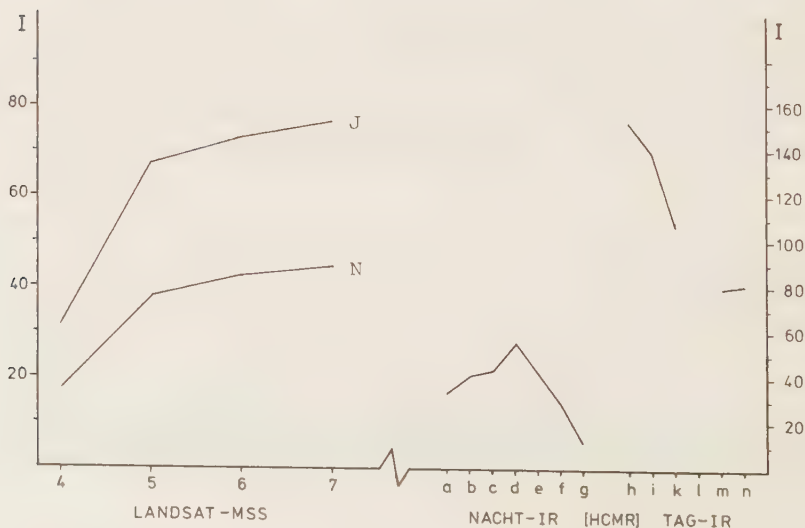
## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

|                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| - FARBE               | 5YR 6/6 reddish yellow |
| - RESISTENZ           | gering                 |
| - KRUSTENBILDUNG      | feine graue Überzüge   |
| - OBERFLÄCHENMATERIAL | Gesteinsgrus           |

## BESONDERHEITEN

Auftreten von dm-m mächtigen Quarzgängen mit Hämatitvererzungen und bis ca. 100 m mächtigen dunklen hornblendereichen Gabbro- und Doleritgängen. Letztere treten zweischarig NW und NE streichend auf und ragen bis zu 50 m über den Gesteinsverband auf.

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT:  $\gamma$ -II      GESTEINTYP: Diorit  
 STRATIGRAPHISCHE EINHEIT:      Präkambrium II      Quarzdiorit

- MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 22, Or 14, Plg (Ab 28)40, Py 10  
 Nebengemengteile Cor 6, Hem 5

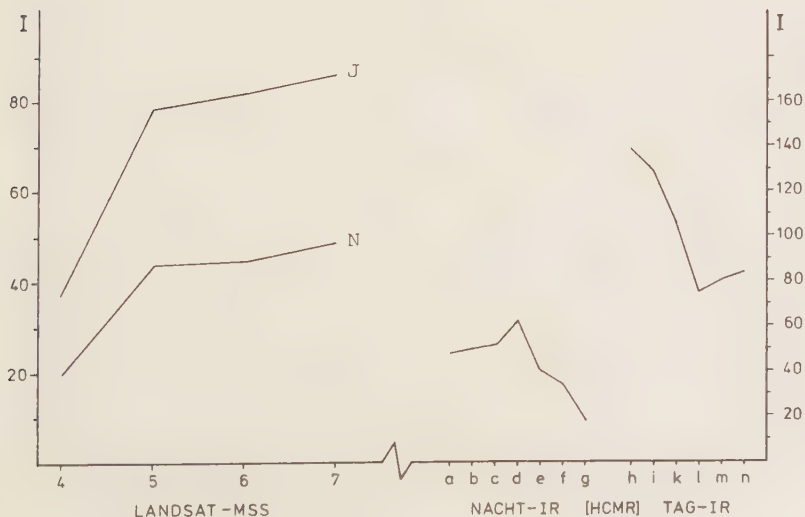
|                                      |                  |
|--------------------------------------|------------------|
| - FARBE                              | 10R 6/2 pale red |
| - BANKUNG                            |                  |
| - KÖRNIGKEIT                         | mittelkörnig     |
| - DICHT E ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 2.56             |
| - POROSITÄT (offene) (Vol%)          | 2.12             |

VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

|                       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| - FARBE               | 5YR 6/4 light reddish<br>brown |
| - RESISTENZ           | mittel                         |
| - KRUSTENBILDUNG      | keine                          |
| - OBERFLÄCHENMATERIAL | Gesteinsgrus                   |

BESONDERHEITEN

SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: qXII GESTEINSTYP: Quarzit

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Präkambrium II

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 80,

Nebengemengteile Plg (Ab 7) 10, Hellgl 9

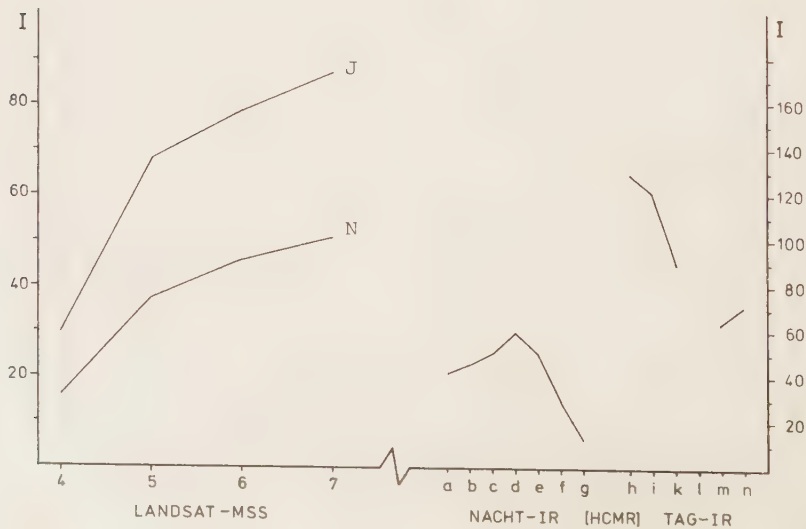
- FARBE 10R 5/2 weak red
- BANKUNG
- KÖRNIGKEIT mittelkörnig
- DICHTER ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 2.63
- POROSITÄT (offene) (Vol%) 1.55

## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

- FARBE 7.5YR 6/6 reddish yellow
- RESISTENZ hoch
- KRUSTENBILDUNG gering
- OBERFLÄCHENMATERIAL Feinschutt

## BESONDERHEITEN

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT:  $\alpha$  XIII<sub>m</sub> GESTEINSTYP: Andesit

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Präkambrium II

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Ab 60, Py 15, Ca 4, Fe-Erz 14  
Nebengemengteile Q 5, Amph 2

## - FARBE

10R 4/2 weak red

## - BANKUNG

## - KÖRNIGKEIT

fein bis mittelkörnig  
mit Ab Einsprenglingen- DICHT (g/cm<sup>3</sup>)

2.74

## - POROSITÄT (offene) (Vol%)

1.40

## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

## - FARBE

5YR 6/4 light reddish  
brown

## - RESISTENZ

mittel

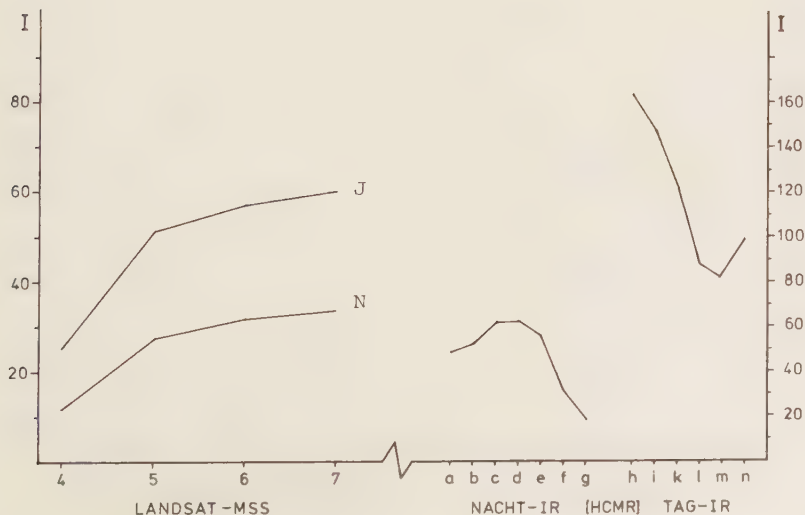
## - KRUSTENBILDUNG

## - OBERFLÄCHENMATERIAL

keine  
splittriger Gesteinsgrus

## BESONDERHEITEN

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT:  $\pi$ XIII<sub>m</sub> GESTEINSTYP: Rhyolith

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Präkambrium III

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 16, Or 12, Plg (Ab40) 62,  
Nebengemengteile Ma 4, Py 2, Ca 3

- |                              |                              |
|------------------------------|------------------------------|
| - FARBE                      | 5YR 4/2 dark reddish gray    |
| - BANKUNG                    |                              |
| - KÖRNIGKEIT                 | mittelkörnig mit Plg Einspr. |
| - DICHT (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.62                         |
| - POROSITÄT (offene) (Vol%)  | 0.80                         |

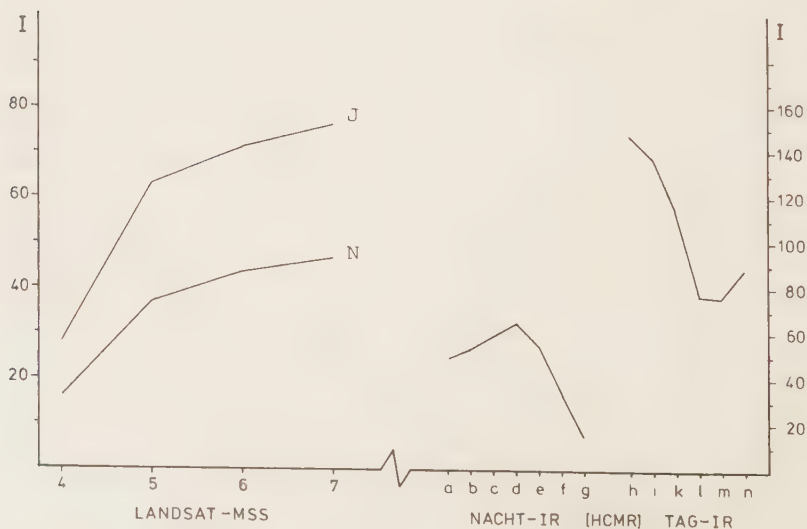
## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

- |                       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| - FARBE               | 2.5YR 5/4 reddish brown        |
| - RESISTENZ           | hoch bis sehr hoch             |
| - KRUSTENBILDUNG      | schwarze Krusten (20 %)        |
| - OBERFLÄCHENMATERIAL | kantige Blöcke im cm-m Bereich |

## BESONDERHEITEN

Wandbildner, Plagioklas Einsprenglinge oberflächennah bis zu 70 % in Sericit und Chlorit umgewandelt.

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT:  $\alpha$ XIIIIs/Ad1a GESTEINSTYP: Konglo-  
merate

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Präkambrium/Kambrium

- MODALBESTAND

Hauptgemengteile Zusammengesetzt im wesentl. aus  
Nebengemengteile den Effusiva d. Präkambrium III

- FARBE 10R 6/2 pale red
- BANKUNG
- KÖRNIGKEIT große, nur schwach gerundete Komponenten
- DICHTHE ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 2.58
- POROSITÄT (offene) (Vol%) 1.18

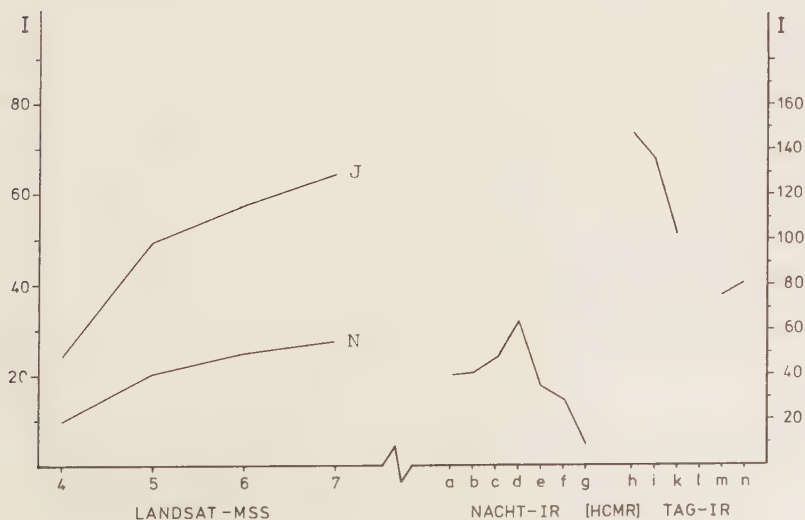
VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

- FARBE 7.5YR 6/6 reddish yellow
- RESISTENZ sehr hoch
- KRUSTENBILDUNG schwarze Krusten (5-10%)
- OBERFLÄCHENMATERIAL Blockschutt

BESONDERHEITEN

Wandbildner; Präkambrium und Kambrium megaskopisch kaum differenzierbar; Kambrium teilweise brecciös ausgebildet; Quarzanteile überwiegen in der Matrix; Auftreten von Gangquarzen.

SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT:  $\gamma$ - $\Delta$  Ad GESTEINSTYP: Andesit

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Infra-Kambrium

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Plg (Ab 35) 81,  
Nebengemengteile Fe-Erz 9, Chl 5, Q 4

- FARBE 2.5 Y 5/0 gray
- BANKUNG
- KÖRNIGKEIT feink. Matrix; Plg Einspr.
- DICHTHE ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) 2.82
- POROSITÄT (offene) (Vol%) 1.10

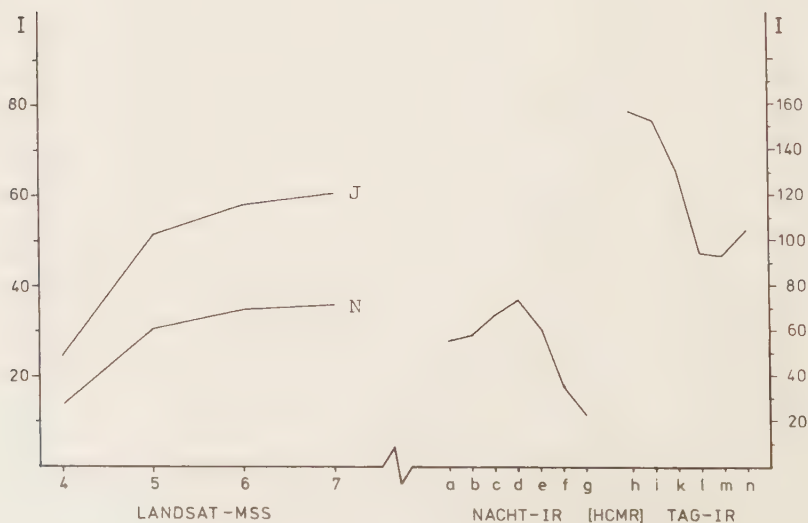
## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

- FARBE 5YR 5/2 reddish gray
- RESISTENZ mittel
- KRUSTENBILDUNG keine
- OBERLACHENMATERIAL grusiger bis splittriger Schutt

## BESONDERHEITEN

ca. 50 % des Plagioklas sind oberflächennah zu Calcit umgewandelt.

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: Ad1      GESTEINSTYP: Dolomit  
 STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Infra-Kambrium (Calcaires inférieurs)

- MODALBESTAND (%)
  - Hauptgemengteile Dolo 85
  - Nebengemengteile Q 7, Chl 5, Mkln 3
- FARBE 10YR 6/1 gray
- BANKUNG dm-m Bereich
- GEFÜGE Mikrosparit-Sparit
- DICHTÉ (g/cm<sup>3</sup>) 2.77
- POROSITÄT (offene) (Vol%) 1.05

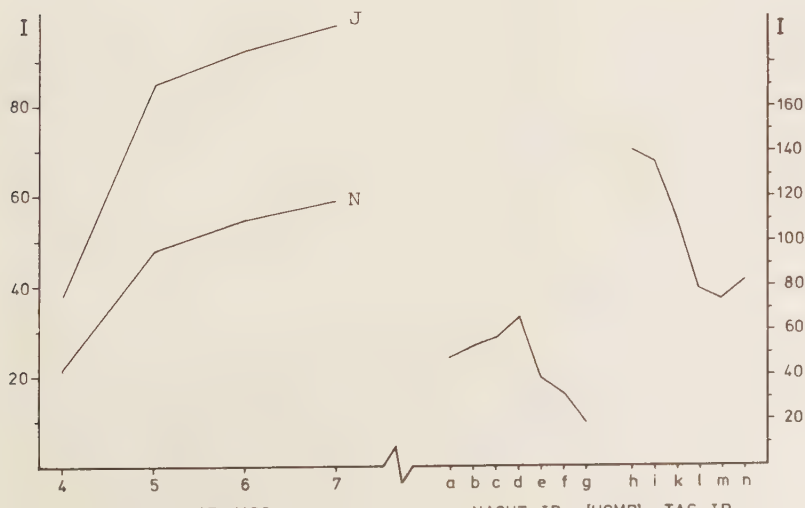
#### VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

- FARBE 7.5YR 5/4 brown
- RESISTENZ hoch
- KRUSTENBILDUNG helle selten dunkle Überzüge (5%)
- OBERFLÄCHENMATERIAL Feinsand bis Blockschutt

#### BESONDERHEITEN

Eingeschaltet in die stromatolithischen Carbonate (Dolomite) sind Tuffite und Sandsteinlagen; letztere sind feinkörnig, schlecht sortiert und zeigen mehr ins rötliche gehende Farben. Ausbildung von Schichtstufen.

#### SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: Ad2b GESTEINSTYP: Arkosesandstein

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Infra-Kambrium (Serie lie de vin)

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Or 48, Q 42

Nebengemengteile Hem 5, Chl 3, Ser 2

## - FARBE

2.5YR 5/2 weak red

## - BANKUNG

dm-Bereich

## - KÖRNICKEIT/SORTIERUNG

feinkörnig, schlecht sortiert

- DICHT (g/cm<sup>3</sup>)

2.41

## - POROSITÄT (offene) (Vol%)

9.67

## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

## - FARBE

5YR 5/6 yellowish brown

## - RESISTENZ

mittel

## - KRUSTENBILDUNG

schwarze Krusten

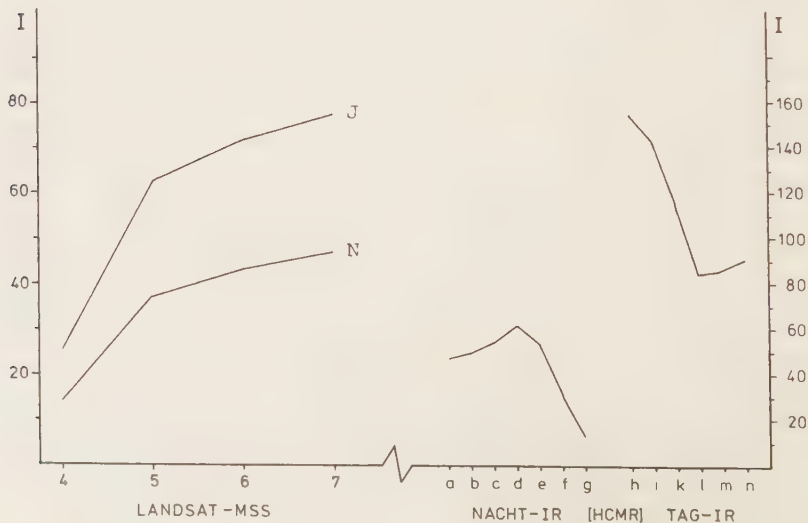
## - OBERFLÄCHENMATERIAL

(30 % nördl. Bereich)  
Gesteinsgrus im Süden,  
Blockschutt im nördl.  
Bereich.

## BESONDERHEITEN

Einschaltungen von roten Mergeln und von Konglomeraten; zum Hangenden Auftreten von Ton-Siltsteinlagen; Zunahme des Pelitanteils von NE nach SW; im Süden weniger bunte aber hellere Farben, steilere Morphologie.

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: Ad3b GESTEINTYP: Carbonat

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Infra-Kambrium (Calcaire superieur)

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Dolo 70, Ca 20, Q 10

Nebengemengteile

## - FARBE

5Y 6/2 light olive gray..

## - BANKUNG

mm - dm Bereich, unruhig

## - GEFÜGE

Sparit

- DICHT (g/cm<sup>3</sup>)

2.75

## - POROSITÄT (offene) (Vol%)

1.12

## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

## - FARBE

7.5 YR 6/4 light brown

## - RESISTENZ

hoch

## - KRUSTENBILDUNG

keine

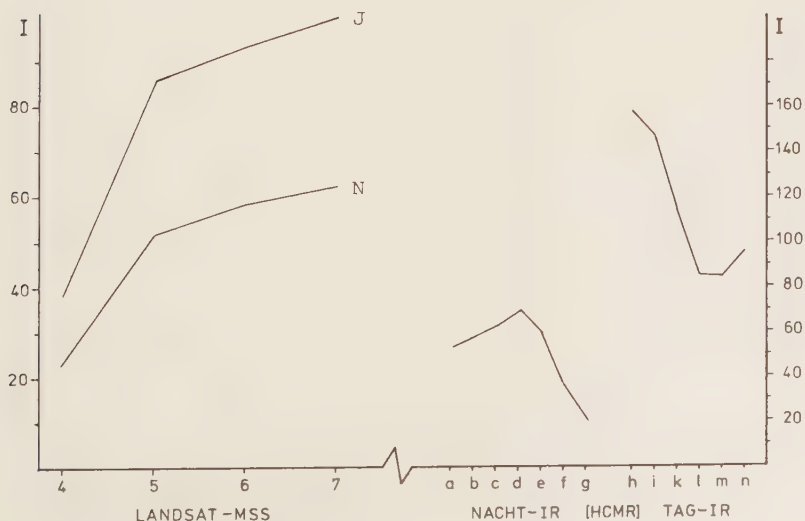
## - OBERFLÄCHENMATERIAL

Blockschutt in dm Größe

## BESONDERHEITEN

Auftreten von Stromatolithen; schichtflächenparallele Silifizierung; im Süden des Arbeitsgebietes Auftreten von Mergellagen im Liegenden.

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: Ki1

GESTEINSTYP: Mergel

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: U-Kambrium (Série schisto calcaire)

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 46, Plg 39

Nebengemengteile Ca 8, Chl 4, Ser 3

## - FARBE

5Y 5/2 olive gray

## - BANKUNG

cm-dm Bereich

## - GEFÜGE

pelitisch

- DICHT E (g/cm<sup>3</sup>)

2.53

## - POROSITÄT (offene) (Vol%)

4.03

## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

## - FARBE

7.5YR 6/4 light brown

## - RESISTENZ

mittel

## - KRUSTENBILDUNG

keine

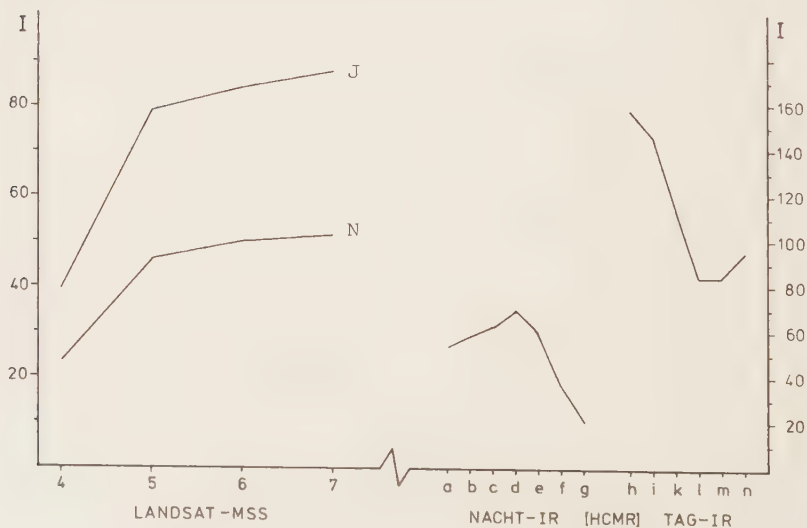
## - OBERFLÄCHENMATERIAL

Feinsand

## BESONDERHEITEN

Flache Hänge, selten Steilstufen; mächtige Einschaltungen von Carbonat- und Siltsteinlagen.

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: K13 GESTEINSTYP: Arkosesandstein

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: U-Kambrium (Grès Terminaux)

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 53, Or 42

Nebengemengteile Ca 3, Chl 1, Ser 1

## - FARBE

10R 5/3 weak red

## - BANKUNG

dm-m Bereich

## - KORNGRÖßE/SORTIERUNG

feinkörnig, gut sortiert

- DICHTER ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

2.58

## - POROSITÄT (offene) (Vol%)

1.82

## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

## - FARBE

2.5YR 5/4 reddish brown

## - RESISTENZ

hoch

## - KRUSTENBILDUNG

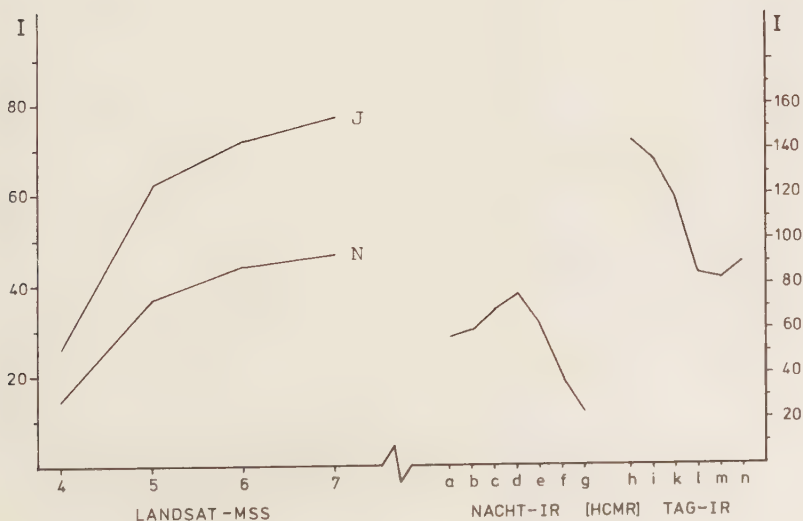
dunkelgrauer Wüstenlack  
(15 %)

## - OBERFLÄCHENMATERIAL

Feinsand bis Gesteins-  
grus

## BESONDERHEITEN

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: Ks1      GESTEINTYP: Tonstein

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: M-Kambrium (Schistes Paradoxides)

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 47, Plg 33, Ser 15

Nebengemengteile Chl 5

- |                                      |                      |
|--------------------------------------|----------------------|
| - FARBE                              | 5Y 5/3 olive         |
| - BANKUNG                            | cm-dm Bereich        |
| - KÖRNIGKEIT/SORTIERUNG              | dicht bis feinkörnig |
| - DICHTER ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 2.61                 |
| - POROSITÄT (offene) (Vol%)          | 3.08                 |

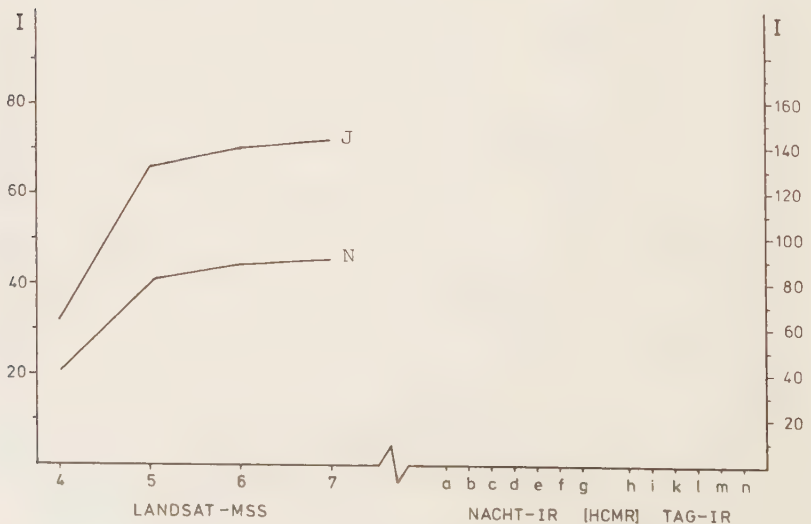
## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

- |                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| - FARBE               | 5Y 5/3 olive       |
| - RESISTENZ           | gering             |
| - KRUSTENBILDUNG      | keine              |
| - OBERFLÄCHENMATERIAL | splittriger Schutt |

## BESONDERHEITEN

Treten als Pedimentflächen und als isolierte Kuppen hervor; unregelmäßige Einschaltungen von Siltsteinlagen und carbonatischen Konkretionen.

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: Ks2a GESTEINSTYP: Quarzsandstein-

Quarzit

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: M-Kambrium (Grès à Conocoryphe)

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 51, Plg 27, Or 12

Nebengemengteile Ca 5, Ser 3, Chl 2

## - FARBE

5Y 5/2 olive gray

## - BANKUNG

cm-dm Bereich

## - KÖRNIGKEIT/SORTIERUNG

dicht bis feinkörnig,  
mittel sortiert- DICHTE ( $\text{g/cm}^3$ )

2.63

## - POROSITÄT (offene) (Vol%)

1.37

## - VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

## - FARBE

2.5Y 5/2 grayish brown

## - RESISTENZ

mittel bis hoch

## - KRUSTENBILDUNG

feine schwärzliche Über-  
züge insbes. an östlich  
exponierten Hängen

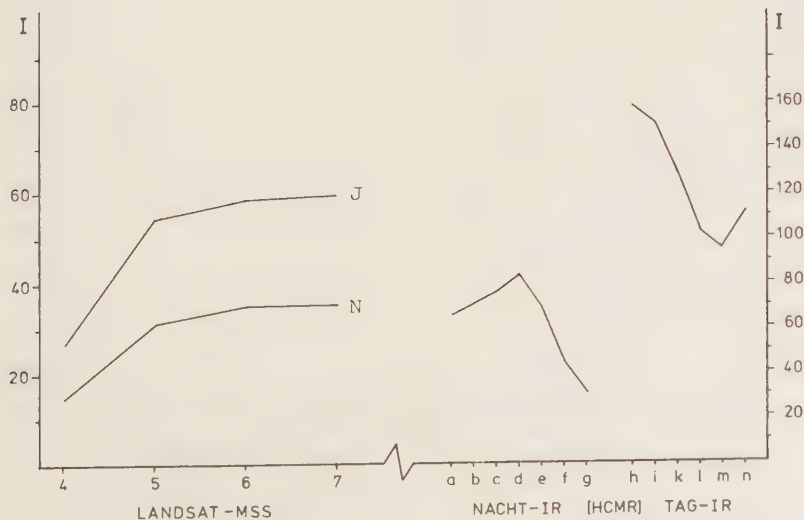
## - OBERFLÄCHENMATERIAL

kantiger Blockschutt

## BESONDERHEITEN

Ausbildung von Schichtstufen

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: Ks2b GESTEINTYP: Quarzsandstein-  
Quarzit  
STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: M-Kambrium (Grès à Conocoryphe)

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 60, Plg 25

Nebengemengteile Or 5, Erz 5, Ser 3, Bio 2,

## - FARBE

2.5 Y 5/4 light olive  
brown

## - BANKUNG

cm-Bereich, unruhig

## - KÖRNIGKEIT/SORTIERUNG

feinkörnig, gut sortiert

- DICHTÉ (g/cm<sup>3</sup>)

2.58

## - POROSITÄT (offene) (Vol%)

3.59

## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

## - FARBE

7.5YR 5/4 brown

## - RESISTENZ

hoch

## - KRUSTENBILDUNG

etwas stärker als KS2a

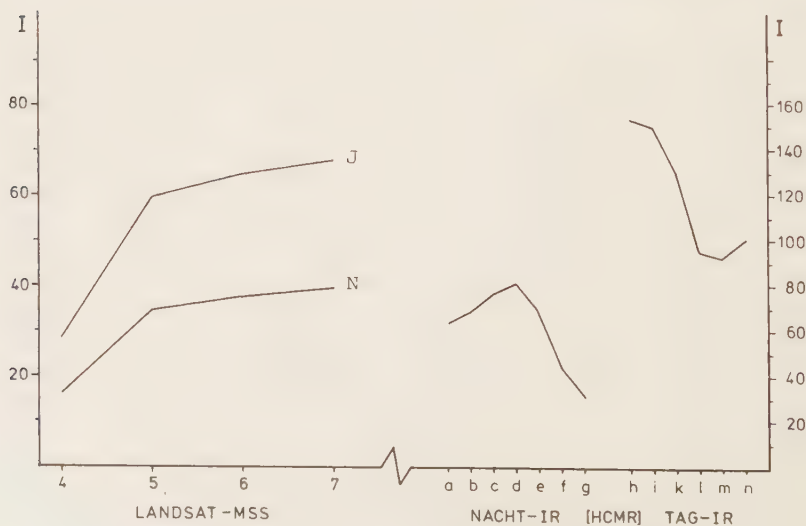
## - OBERFLÄCHENMATERIAL

Feinsand bis Blockschutt

## BESONDERHEITEN

reduzierte Peliteinschaltungen gegenüber Ks2a

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: or1-2 GESTEINSTYP: Ton-Siltstein

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Ordovizium/Areniq-Tremadoc (Schistes  
des Fezouata)

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 32, Plg 30, Chl 20, Ser 18  
Nebengemengteile

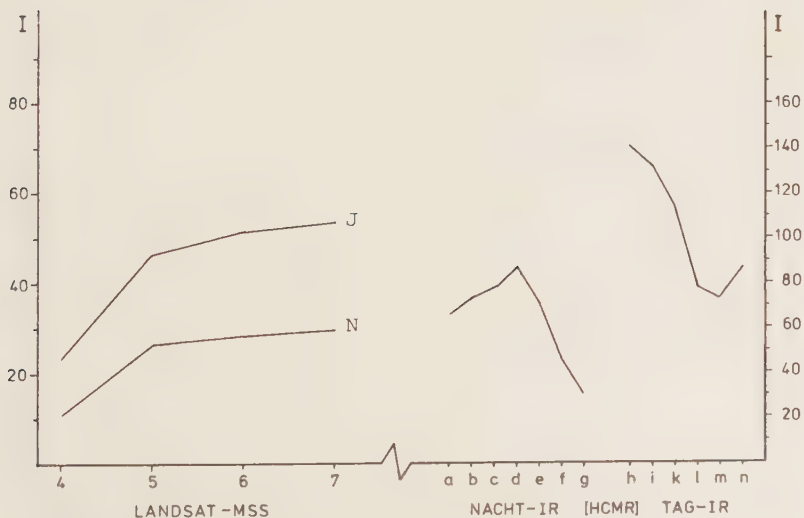
- |                              |                            |
|------------------------------|----------------------------|
| - FARBE                      | 2.5Y 5/4 light olive brown |
| - BANKUNG                    | cm-Bereich                 |
| - KÖRNICKEIT/SORTIERUNG      | feinkörnig, gut sortiert   |
| - DICHT (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.56                       |
| - POROSITÄT (offene) (Vol%)  | 5.05                       |

## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

- |                       |                                |
|-----------------------|--------------------------------|
| - FARBE               | 10YR 6/4 light yellowish brown |
| - RESISTENZ           | gering                         |
| - KRUSTENBILDUNG      | keine                          |
| - OBERFLÄCHENMATERIAL | Feinsand bis Grus              |

## BESONDERHEITEN

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: or4 GESTEINSTYP: Quarzit

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Ordovizium/Llandeilo  
(Schistes du Premier Bani)

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 69, Plg 21

Nebengemengteile Ca 8, Ser 2

## - FARBE

10YR 8/2 white

## - BANKUNG

cm-dm Bereich

## - KORNIKEIT/SORTIERUNG

dicht bis feinkörnig

- DICHTE ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

2.56

## - POROSITÄT (offene) (Vol%)

3.39

## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

## - FARBE

5YR 6/4 light reddish  
brown

## - RESISTENZ

sehr hoch

## - KRUSTENBILDUNG

graue bis rotbraune Über-  
züge

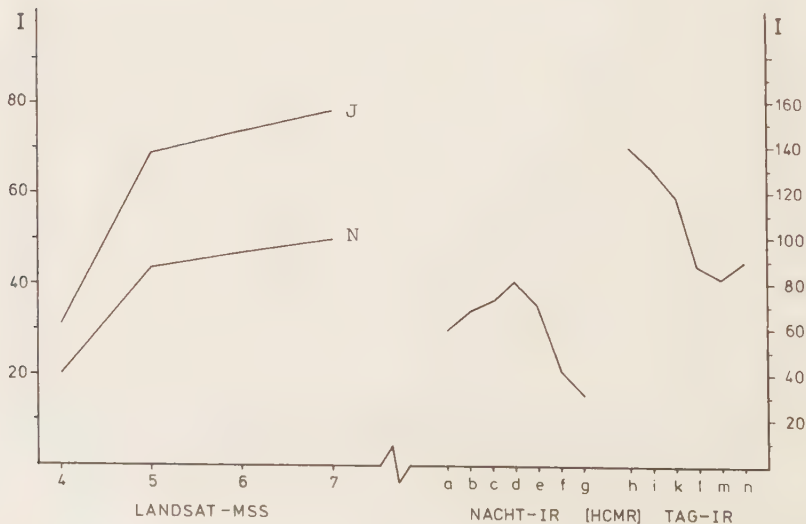
## - OBERFLÄCHENMATERIAL

kantiger z.T. rhombischer  
Blockschutt

## BESONDERHEITEN

Massige Ausbildung, Wandbildner

## SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT: or5b GESTEINSTYP: Quarzsandstein-  
Quarzit

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Ordovizium/Caradoc (Formation de  
Roud-Aissa)

- MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Q 78, Or 10

Nebengemengteile Ser 7, Chl 3, Bio 2

- FARBE

10YR 4/2 dark grayish  
brown

- BANKUNG

cm-dm Bereich

- KÖRNIGKEIT/SORTIERUNG

mittelkörnig bis dicht,  
gut sortiert

- DICHTHE ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

2.64

- POROSITÄT (offene) (Vol%)

0.67 verwittert: 5.12

VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

- FARBE

10YR 3/3 dark brown

- RESISTENZ

mittel bis hoch

- KRUSTENBILDUNG

feine hellbraune Krusten

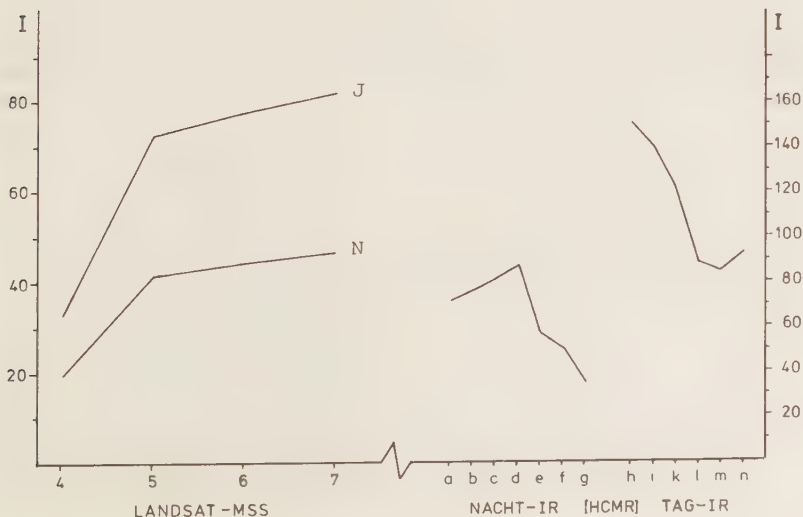
- OBERFLÄCHENMATERIAL

kantiger Blockschutt

BESONDERHEITEN

Fließender Übergang Sandstein - Quarzit; Mineralbestand  
gleichbleibend; Zwischenschaltung von Pelitlagen

SPEKTRALE MERKMALE



PHOTOGEOLOGISCHE EINHEIT:  $\delta_2H$  GESTEINSTYP: Dolerit

STRATIGRAPHISCHE EINHEIT: Trias

## - MODALBESTAND (%)

Hauptgemengteile Plg 47, Ol 31, Py 10, Erz 12

Nebengemengteile

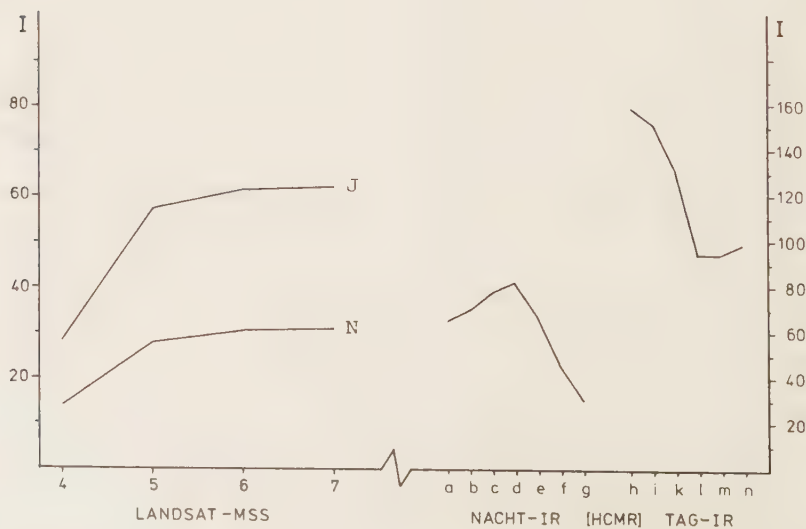
- FARBE 10YR 3/2 very dark grayish brown
- BANKUNG
- KÖRNIGKEIT/SORTIERUNG mittelkörnig, gleichkörnig
- DICHTHE ( $g/cm^3$ ) 2.76
- POROSITÄT (offene) (Vol%) 3.56

## VERWITTERUNGSEIGENSCHAFTEN

- FARBE 10YR 3/2 very dark grayish brown
- RESISTENZ gering bis mittel
- KRUSTENBILDUNG keine
- OBERFLÄCHENMATERIAL feinkörniger Grus

## BESONDERHEITEN

## SPEKTRALE MERKMALE



## V. Datenkorrelation

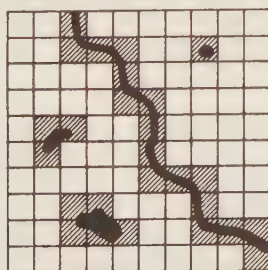
In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten und Grenzen der Auswertbarkeit digital aufgezeichneter Satellitenbilder bezüglich ihres Auflösungsvermögens und ihrer spektralen Inhalte aufgezeigt. Es folgt eine Diskussion verschiedener Einflußparameter und multitemporaler Aspekte. Im Anschluß werden die strukturellen und spektralen Bildinhalte auf der Basis der ausgewerteten thematischen Karten mit den Gelände- und Labor-daten korreliert und die, für die jeweilige Aufgabenstellung am besten geeigneten Daten und Verarbeitungsmethoden festgelegt.

## 1. Auflösung und Kontrast

In der Photographie ist die Auflösung herkömmlich definiert als maximale Anzahl paralleler Linien, die auf 1 mm im Bild noch als getrennt zu erkennen sind (L/mm). Das Auflösungsvermögen ist abhängig von der Gestalt, der Größe und dem Kontrast des betrachteten Objektes. Ein objektiveres Kriterium zur Beurteilung der Bildgüte stellt die sogenannte Modulations Übertragungsfunktion (MTF) dar, die die Kontrastverhältnisse von Objekt zu Abbildung als Funktion der Ortsfrequenz darstellt. Eine detaillierte Erläuterung geben u.a. Finsterwalder & Hofmann, (1968).

Die Bodenauflösung von Scannersystemen, oft auch lineare Auflösung genannt, hängt u.a. von der Bodenpixelgröße ab. Sie beträgt bei LANDSAT-MSS  $79 \times 79 \text{ m}^2$ , bei HCMR  $600 \times 600 \text{ m}^2$ . Dennoch können bei optimalen Kontrastverhältnissen kleinere Objekte abgebildet werden. Ein extremes Beispiel ist die Straße von Bou-Azzer nach Tazenakht. (Abb.1, 46) Sie wird im Bereich der Mulde bei Ait Tagzizaout trotz einer maximalen Breite von 10 m in allen Kanälen von LANDSAT-MSS abgebildet; jedoch nur in den stark kontrastierenden Bereichen gering reflektierender, untexturierter alluvialer Ebenen. In stärker reliefierten Regionen und im Bereich hoch reflektierender Oberflächen um Tazenakht kann sie nicht verfolgt werden.

Unter diesen Bedingungen abgebildete Objekte erscheinen übertrieben groß und sind aus einer Mischsignatur von Objekt und umgebendem Objekt zusammengesetzt (Abb. 48).



- ☐ PIXEL (PICTURE ELEMENT)
-  OBJEKT mit starkem Kontrast zur Umgebung
-  ABBILDUNG als Mischsignatur

Abb. 48: Erscheinungsbild von kleinen, unter der linearen Auflösung liegenden Objekten im Scannerbild

## 2. Albedo und spektrale Signifikanz

Die Albedo ist definiert als das Verhältnis reflektierter zu einfallender elektromagnetischer Strahlung. Jedes Material hat eine entsprechende Albedo, bezogen auf einen einzelnen Spektralauszug beliebiger Bandbreite. Die Albedo ist gleichsam eine panchromatische Komponente, die sich in verschiedenen Grauwerten abbildet und für sich keine spektralen Eigenschaften beinhaltet.

Kombiniert man drei Spektralauszüge, also drei Albedokomponenten durch additive oder subtraktive Farbfilterung zu einem neuen Bild, so entstehen Farben durch Albedounterschiede der Ausgangskomponenten zueinander. Objekte gleicher Albedo in den drei verwendeten Auszügen werden somit im Farbbild als eine der unbunten Farben zwischen Weiß und Schwarz je nach Reflexionsgrad abgebildet. Objekte mit z.B. höchster Reflexion im grün kodierten Auszug werden in einer grünen Farbe abgebildet. Die Reinheit oder Sättigung dieser grünen Farbe wird bestimmt durch das Verhältnis zu den Albedoanteilen der blau und rot kodierten Auszüge. Sind die Reflexionsunterschiede groß, erscheint die Farbe satt, sind sie wie bei den meisten Gesteinsoberflächen gering, so resultiert ein ungesättigtes Pastellgrün. Die spektralen Eigenschaften ergeben sich somit aus der Kombination variierender Albedokomponenten.

Rückblickend auf die Farbraumtransformation nach Intensität, Farbfrequenz und Sättigung entspricht die Intensität der Summe der Albedokomponenten, Farbfrequenz und Sättigung charakterisieren die spektralen Eigenschaften, hervorgerufen durch Variationen der Albedokomponenten. Aus diesem Zusammenhang kann abgeleitet werden, daß Objekte gleicher Albedo unterschiedliche spektrale Eigenschaften haben können und umgekehrt, Objekte gleicher spektraler Eigenschaften verschiedene Albedo aufweisen können.

Die mehrkanalige Aufzeichnung von LANDSAT-MSS ermöglicht die Erfassung und Beurteilung spektraler Eigenschaften oder Signaturen. Sie sind für die lithologische Kartierung ein sicheres und sensibleres Beurteilungskriterium als die Albedo. Die spektrale Information kann mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden (Ratio-, Hauptachsen-, IHS-Transformation) unabhängig von der Albedo und Beleuchtungsbedingungen erfaßt werden. Im Gegensatz dazu sind Albedo und Beleuchtungsbedingungen fest miteinander verknüpft, wodurch in Regionen mit starker Reliefenergie eine Trennung von Intensität und Beleuchtung, und folglich eine photogeologische Abgrenzung oft erschwert oder gar unmöglich ist (z.B. dunkle Basaltströme in schattigen Tälern).

Andererseits ist die Albedoinformation für die strukturgeologische Auswertung von FE-Daten von größter Wichtigkeit. Die Kartierung von Lineamenten, Schichtköpfen, Entwässerungsnetzen etc. sowie eine gute Orientierung sind ohne "räumlichen" Bezug durch Licht und Schatten nicht möglich, wobei allerdings multitemporale Einflüsse stark berücksichtigt werden müssen (Kap.V.5.). Letztlich soll nicht unerwähnt bleiben, daß die Albedokomponente mit der Abbildung von Texturen und Landschaftsformen einen wesentlichen Beitrag zur lithologischen Kartierung leisten kann, ebenso wie eine spektrale Aufschlüs-

selung bei der Kartierung von Versatzbeträgen an Scherklüften eine wichtige Rolle spielen kann.

### 3. Spektrale Signatur, Lithologie und Stratigraphie

Spektrale Eigenschaften, auch spektrale Signaturen oder nur Signaturen genannt, sind Kennziffern für Oberflächen(MSS) oder oberflächennahe Bereiche (HCMR) und deuten auf ein spezifisches Remissionsvermögen (Reflexion, Emission) in den betrachteten Kanälen bestimmter Auslegung hin. Kiefer & Lillesand (1979) bevorzugen den Begriff "Spectral Response Pattern", da der Ausdruck "Signatur" Einzigartigkeit und Absolutheit impliziert. Dies ist bei natürlichen Objekten nicht der Fall. Signaturangaben, (z.B. die Kurvendarstellungen in Kap.IV.) sind zwar quantitativ, aber nicht absolut. Sie können kennzeichnend sein, sind aber nicht zwingend einzigartig.

Beispielsweise hat Bothorel (1983) spektrale Bodenmessungen in verschiedenen Bereichen des Anti-Atlas u.a. mit einem zu LAND-SAT-MSS vergleichbaren Geländespektrometer (Exotech), durchgeführt. Solche Messungen sind insbesondere geeignet atmosphärische Einflüsse zu kalkulieren (Stänz, 1978), die Ergebnisse können jedoch für Gesteine nicht als absolut gewertet werden.

Daten aus dem reflektiven Bereich des elektromagnetischen Spektrums liefern, bei einer Eindringtiefe der Strahlung von  $\lambda/2$ , Informationen nur von den Oberflächen der Gesteine. Das Emissionssignal aus dem thermalen Infrarot liefert je nach Gesteins-, Oberflächenbeschaffenheit und Aufnahmedatum Informationen aus den oberen cm Bereichen. Beide Strahlungsdaten vermitteln somit nur Teilinformationen über den gesamten Gesteinsverband, wobei schon geringmächtige Auflagen von Lokermaterialien und Wüstenlacken oder verdorrte Vegetation auch in ariden Gebieten die Signaturen der anstehenden Gesteinskörper maskieren (Kap. V.4.).

Geht man von den Prinzipien der Photointerpretation aus (Kap. I.4.), darf man erwarten, daß ähnliche Gesteine unter vergleichbaren Rahmenbedingungen ähnliche Oberflächen "ausbilden" und damit ähnliche Signaturen remittieren. Daraus folgt, daß lithologisch ähnliche Gesteinskörper vergleichbare Signale zurücksenden. Somit ist ein Rückschluß auf lithologische Variationen möglich, nicht aber generell auf stratigraphische Einheiten, an denen sich die geologische Geländekartierung orientiert.

Dennoch steht die Photointerpretation nicht grundsätzlich im Widerspruch zur Stratigraphie, da zeitliche Grenzen in den meisten Fällen mit lithologischen Änderungen und folglich mit spektralen Variationen verbunden sind. Liegt eine stratigraphische Grenze, festgelegt z.B. durch Fossilbestand, in einem lithologisch homogenen Gesteinsverband, so kann sie mit Hilfe fernerkundlicher Methoden nicht erfaßt werden. Andererseits kann eine stratigraphische Einheit aufgrund spektraler Unterschiede oft in mehrere, lithologisch-faziell unterschiedliche Bereiche gegliedert werden. Beide Gegebenheiten werden in Kap.V.7. dargestellt.

## 4. Diskussion von Einflußparametern

Die Signale der beiden völlig verschiedenen Datensätze (MSS/HCMR) werden von einer Vielzahl von Parametern unterschiedlich stark modifiziert. Der Einfluß von Atmosphäre und Beleuchtungsbedingungen und ihre mögliche Kompensation wurden bereits vorgestellt und diskutiert. Die Auswirkungen variierender Sonnenstände, bezogen auf das Geländere relief und die Folgen für die Auswertung und Interpretation werden in Kap.V.5. aufgezeigt.

Neben diesen beiden äußeren Einflüssen, spielen die Bodenfeuchte, Rauigkeit sowie Verwitterung, Krustenbildung und die Vegetation eine wichtige Rolle. Die Bodenfeuchte wirkt sich anteilmäßig auf alle MSS-Kanäle aus und hat eine Minderung der Rückstrahlung durch die Absorption des Wassers zur Folge. Mit steigendem H<sub>2</sub>O-Gehalt ist eine Abnahme der Albedo zu verzeichnen, wobei die spektralen Eigenschaften nur unwesentlich variieren (Abb. 49). Aus diesem Grunde ist es schwierig und oft unmöglich ohne multitemporale Aufnahmen und entsprechende "real-time" Geländemessungen abzuschätzen, ob es sich um zwei eigenständige photogeologische Einheiten, oder um eine Einheit mit variierendem H<sub>2</sub>O-Gehalt handelt.

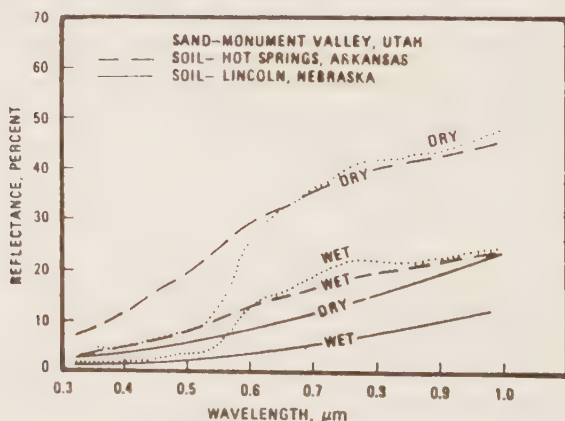


Abb. 49: Spektralkurven unterschiedlicher Böden in feuchtem und trockenem Zustand (nach Sabins, 1978)

Eine ähnliche, nicht geringere Problematik ergibt sich bei der Bodenfeuchtebestimmung mit Hilfe von Thermaldaten. Die bis zu fünfmal höhere Wärmekapazität von Wasser gegenüber Gesteinen und Böden bewirkt geringere Temperaturschwankungen im Tag-Nachtzyklus und erhöhte Werte für die thermale Trägheit. Wenn auch das Emissionssignal sensibler auf Bodenfeuchtigkeiten reagiert, so ist die Zahl und Vielschichtigkeit anderer beeinflussender Größen weit höher. Auch hier sind für eine

Abschätzung Bodenreferenzmessungen unbedingt nötig. Aus Daten des geostationären Wettersatelliten "METEOSAT" konnte abgeleitet werden, daß keine stärkeren Niederschläge im zeitlichen Vorfeld der bearbeiteten Aufzeichnungen im Testgebiet erfolgt sind. Aus diesem Grunde wurde auf weitere Untersuchungen zum Wasserspeichervermögen und den möglicherweise sich daraus ergebenden zusätzlichen Differenzierungen verzichtet.

Wie der Einfluß des Wassers, so bewirkt auch eine Zunahme der Bodenrauigkeit (im Mikromaßstab) wie eine erhöhte Textur oder Reliefenergie (im Makromaßstab) eine Erniedrigung der Albedo. Abb. 50 zeigt die Intensitätsanteile eines nicht, bis stark texturierten Arkosesandsteins (Ad2) in den vier MSS-Kanälen. Die abgebildeten Kurven können durch Normierung ineinander überführt werden, wodurch die Beibehaltung der spektralen Eigenschaften angezeigt ist. Die Abnahme der Albedo durch Häufung der Texturelemente (aus dem Satellitenbild) ist auf das vermehrte Auftreten von Schattenanteilen zurückzuführen. Messungen an weiteren Einheiten führten zu vergleichbaren Ergebnissen. Auch die Anordnung der Texturen oder die Verteilung (Muster), ausgelöst z.B. durch tektonische Beanspruchung oder Erosionsvorgänge, bewirken keinen maßgeblichen Einfluß auf das spektrale Erscheinungsbild.



Abb. 50: Arkosesandstein mit unterschiedlich stark ausgeprägter Textur

Ganz erhebliche Unterschiede in der spektralen Signatur sind dagegen zwischen frisch angeschlagenen Steinen und deren verwitterter Oberfläche zu verzeichnen. Abb. 51 zeigt ein

repräsentatives Beispiel für einen Andesit (nach Siegal & Gillespie, 1980). Die Kurven veranschaulichen nicht nur die reduzierte Reflexion einer verwitterten Oberfläche gegenüber dem frischen Bruch, sondern auch den geradlinigeren Verlauf und die spektralen Veränderungen gegenüber natürlichen Oberflächen. Letztere Erscheinung kommt auch im Vergleich der Farbestimmungen an frischem und verwittertem Material in Kap. IV. zum Ausdruck. Auch wenn generell davon ausgegangen werden darf, daß gleiche Gesteine unter gleichen Rahmenbedingungen gleiche Verwitterungskrusten aufweisen, so wird an diesem Beispiel besonders deutlich, daß die Oberflächenbeschaffenheit, insbesondere die mit LANDSAT-MSS detektierbaren Farbnuancen keinen quantitativen Rückschluß auf die spektralen Eigenschaften frischer Gesteinsoberflächen zulassen. Das spektrale Muster verwitterter Oberflächen im Bereich  $0.5 - 1.1 \mu\text{m}$  wird dabei in den meisten Fällen nicht von den Hauptgemengteilen, sondern von Spurenelementen wie z.B.  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  (vorwiegend in ariden Bereichen) bestimmt. Nach Angaben von Barret & Curtis (1978), verursacht der Einfluß von Wasser bei verwitterten Oberflächen (vermutlich wegen des vergrößerten zugänglichen Porenraums) eine verstärkte Minderung der Albedo gegenüber frischen Gesteinen.

Eine ähnliche Problematik ist, wenn auch etwas verlagert, bei den Thermaldaten gegeben. Das vom HCMR aufgezeichnete Signal läßt zwar einen Rückschluß auf die oberen cm-Bereiche zu, reagiert aber dafür weitaus sensibler auf geringmächtige Auflagen von Lockermaterialien, wie sie in ariden Gebieten an-

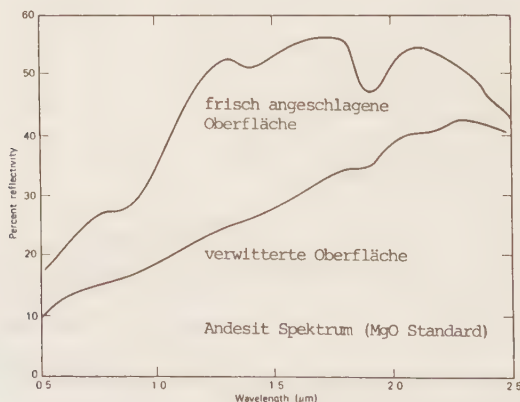
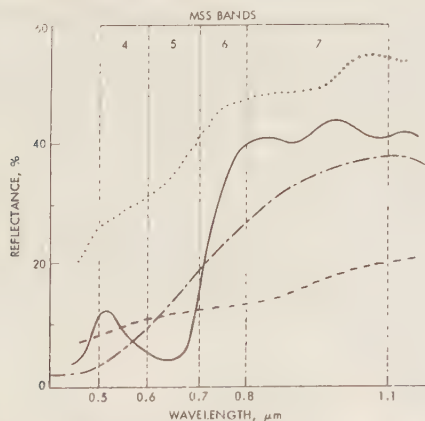


Abb.51: Reflexionsspektrum eines Andesit mit frischer und verwitterter Oberfläche (nach Siegal & Gillespie, 1980)

nähernd überall vorzufinden sind. Somit kommt es auch hier zu Signalmodifikationen, die neben einer Reihe zusätzlicher Einflußparameter eine quantitative Analyse zumindest in Frage stellen.

Eine starke Maskierung von Gesteinsoberflächen, insbesondere im reflektierten Bereich des Em.Spektrums, wird durch Krustenbildungen verursacht. Die in ariden Regionen auftretenden Fe, Mn- und Fe,Al-Oxidhydrat Überzüge sind im Arbeitsgebiet an Gesteine mit hoher Erosionsresistenz gebunden. Alle betroffenen Einheiten, vorwiegend Rhyolithe, Dolomite, Quarzite, verfestigte Sandsteine und Konglomerate neigen zu Blockschuttbildung. Eine Korrelation zum Porenraum (vergleiche Tabellen in Kap.IV) ist nicht gegeben. Roland (1973) konnte im Bereich des Tibesti, Zentralsahara, härtere von weichen Gesteinen anhand der unterschiedlichen Patina trennen und führt die Ausbildung verschieden starker Krusten auf die Zeitspanne zurück, der die Gesteinsoberflächen dem Einfluß der Atmosphäre ausgesetzt sind. Da grob- und mittelklastisches Material in ariden Klimaten schneller verwittert als feinklastisches, können Krustenbildungen in groben Zügen auch einen Hinweis auf die Korngröße liefern.

Eine wesentliche Rolle für die Krustenbildung, wie auch für das Auftreten von Vegetation spielen die hygrischen und thermischen Verhältnisse. Bei näherer Betrachtung von Abb. 36 wird eine allgemeine Abnahme der Intensitäten und eine verstärkte Rotfärbung aller Oberflächen im oberen Bereich der Szene erkennbar. Diese Erscheinung ist durch die, im nördlichen Bereich auftretende spärliche Buschvegetation sowie eine partiell verstärkte Krustenbildung bedingt und auf geringfügig erhöhte Niederschlagsraten (50-100 mm/a) und niedrigere Tagestemperaturen zurückzuführen. Abb. 52 zeigt gemittelte Spektralkurven hoch- und gering reflektierender Gesteine zusammen mit den Kurven frischer und verdorrter Vegetation im Bereich der LANDSAT-MSS Kanäle.



helle Gesteine  
gesunde Vegetation  
verdorrte Vegetation  
dunkle Gesteine

Abb. 52: Gemittelte Spektralkurven stark und gering reflektierender Gesteine sowie frischer und verdorrter Vegetation

Während die Spektralkurven der Gesteine einen relativ gleichförmigen Verlauf aufweisen, zeigt die gesunde Vegetation ausgeprägte Maxima und Minima. Das relative Maximum in Kanal 4

bewirkt, in Verbindung mit den Absorptionsbanden in Kanal 5 und dem nicht aufgezeichneten blauen Spektralbereich das grüne Farbempfinden des menschlichen Auges für die Vegetation. Das starke Maximum im nicht sichtbaren, nahen Infrarotbereich (Kanal 6 und 7) ergibt zusammen mit Kanal 4 und 5 die kräftigen roten Farben in herkömmlichen Falschfarbenbildern.

Bei verdorrter Vegetation kommt es zu einer Umkehrung des Reflexionsverhaltens in den Kanälen 4 und 5, wodurch beim Sehvorgang ein gelbbrauner bis rotbrauner Farbeindruck entsteht. Das absolute Maximum im IR-Bereich bleibt erhalten, wenngleich die Intensität in diesen Kanälen stark zurückgeht. Dieses Spektralverhalten der Vegetation kann auch genutzt werden, um unterschiedliche Vitalitätsgrade (Baumschäden) zu erfassen und für die Darstellung zu optimieren (Kaufmann et al., 1984 b).

Aus diesem Beispiel wird deutlich, daß das Auftreten auch nur spärlicher Vegetation zur Maskierung d.h. zu Mischsignaturen bei Gesteinsoberflächen führt. Abb. 53 a + b zeigen die, über gleichen lithologischen resp. stratigraphischen Einheiten quantitativ ermittelten Spektralkurven mit Vegetationsflächenanteilen von 0%, 5% und 10%. Die völlig vegetationsfreien Flächen liegen im Süden des Testgebiets, die mit ca. 10 %-Anteilen im Norden. Beide Abbildungen verzeichnen einen Rückgang der Albedo mit zunehmender Vegetation, wobei die stärkere Abnahme bei der Serie Ad2b (Arkosesandsteine) (Abb. 53b) auf eine gleichzeitig vermehrte Krustenbildung im Norden des Testgebiets zurückzuführen ist. Augenfällig ist weiter, daß die Intensitätsabnahme von Kanal 7 gegenüber den restlichen Kanälen geringer ist. Das relative Verhältnis der Intensitäten zueinander wird, wie Abb. 53 zeigt, trotz des generellen Albedorückgangs zugunsten des Infrarotbereichs verschoben. Hieraus resultieren die roten Farbnuancen im nördlichen Bereich des Testgebiets (Abb. 36). Der Einfluß der Vegetation auf die Thermaldaten konnte hier nicht abgeschätzt werden. Gossmann (1980), gibt am Beispiel eines gemäßigt humiden Klimabereichs einen ausführlichen Einblick in diese Thematik.

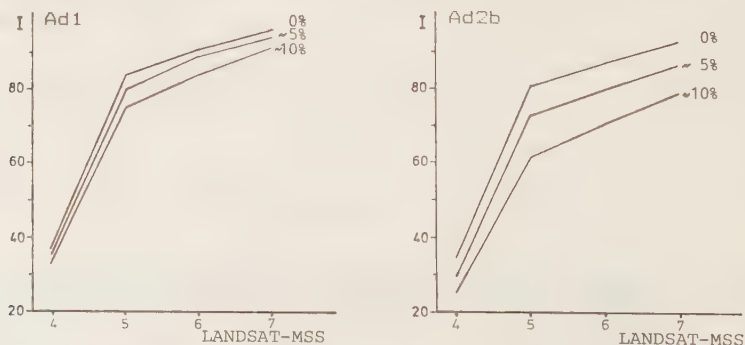


Abb. 53a+b: LANDSAT-MSS Spektralkurven von Dolomit (Ad1) und Arkosesandstein (Ad2b) mit unterschiedlicher Vegetationsbedeckung von 0%, 5% und 10%.

### 5. Multitemporale Aspekte

Ein bedeutender Anwendungsbereich von Satellitenbilddaten besteht, neben der multispektralen Beurteilung, in der Auswertung multitemporaler Aufnahmen, gewährleistet durch die Orbitcharakteristiken insbesondere der Wiederholungsrate meist freifliegender Systeme.

Somit ist die Möglichkeit gegeben, unterschiedliche Oberflächen einmal in ihren zeitlichen Veränderungen zu erfassen und zum anderen den Einfluß variierender Beleuchtungsbedingungen zu prüfen. Die folgenden Untersuchungen und Diskussionen konzentrieren sich aufgrund fehlender dynamischer Phänomene, wie dichter Vegetationbedeckung oder stärkerer Bodenfeuchte, im wesentlichen auf den Einfluß des Sonnenstandes.

#### 5.1. Beurteilung spektraler Signaturen von MSS

Bei anstehenden Gesteinsoberflächen handelt es sich um statische Phänomene, die keinen kurz- oder mittelfristigen Veränderungen unterworfen sind und ihre spektralen Eigenschaften, im Gegensatz z.B. zu Vegetationsflächen, beibehalten. Letzteres gilt im wesentlichen auch für Lockermaterialien, die durch Erosionsvorgänge gebildet und von Wind, Wasser und durch die Schwerkraft verfrachtet werden. Lediglich eine Verlagerung der Erosionsrinnen und Wadis in Talebenen, Schutt- und Schwemmfächern kann kurzfristig erfolgen, wirkt sich aber nicht generell auf die Signatur sondern auf die Textur, das Muster oder auf einzelne Strukturen aus.

So lassen sich die in Kap.IV dargestellten LANDSAT-MSS Spektralkurven von Juli und November durch Normierung (z.B. durch Division) ineinander überführen. Nur der kurzwellige Kanal (MSS- 4) zeigt im November zu hohe Intensitäten, was auf den niedrigen Sonnenstand (Tab. 4), die daraus resultierenden großflächigeren Schlagschatten und die damit in Verbindung stehenden, überhöhten Streulichtanteile zurückzuführen ist (Kap.II.3.1.1.).

Das spektrale Erscheinungsbild von Gesteinsoberflächen bleibt, eine gleiche Vorbehandlung der Daten durch die Bodenempfangsstation vorausgesetzt, erhalten (Kap.II.2.), wenngleich in den Novemberdaten eine gleiche prozentuale Verringerung kanalspezifischer Intensitäten, eine geringere Dynamik in allen Kanälen und eine Zunahme der Schattenanteile zu verzeichnen ist. Letztes kommt auch in den Korrelationsmatrizen (Tab. 9) der korrespondierenden Juli- und Novembereaufzeichnungen zum Ausdruck.

| MSS-Band | 4     | 5     | 7     | MSS-Band | 4     | 5     | 7     |
|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
| 4        | 1.000 | 0.954 | 0.891 | 4        | 1.000 | 0.938 | 0.855 |
| 5        |       | 1.000 | 0.954 | 5        |       | 1.000 | 0.943 |
| 7        |       |       | 1.000 | 7        |       |       | 1.000 |
| November |       |       |       | Juli     |       |       |       |

Tab. 9 : Korrelationsmatrizen identischer Szenen aus zwei Jahreszeiten (ohne Kanal 6)



Abb. 54 Ratio 4/5 der Novembraufnahme kontrastverstärkt  
Vergleiche Abb. 25a

Die geringere Energieein- und -ausstrahlung im November bewirkt zudem eine Verschlechterung des Signal/Rausch Verhältnisses. Abb. 54 (Ratio 4/5 Nov.) im Vergleich mit Abb. 25a (Ratio 4/5 Juli) verdeutlicht sowohl diesen Effekt, wie die spektrale Konstanz, die für diesen Szenenausschnitt auch auf die wenigen Vegetationsflächen zutrifft.

Aus vorgenannten Ergebnissen ist klar abzuleiten, daß für eine Beurteilung spektraler Signaturen, also für die Kartierung unterschiedlicher Gesteins- oder Vegetationseinheiten etc. Daten mit möglichst hohem Sonnenstand (el.) zur Verarbeitung und Interpretation bevorzugt werden müssen.

### 5.2. Beurteilung strukturgeologischer Inhalte von MSS

Während für die Erfassung spektraler Signaturen die Sonnenelevation eine maßgebende Rolle spielt, ist für eine strukturgeologische, insbesondere für die Lineamentkartierung der Sonnenazimut von größerer Bedeutung. Untersuchungen zu unterschiedlichen Richtungshäufungen durch Beleuchtung und den Zustand der Vegetation, wurden u.a. von Bodechtel & Nithack, (1974) durchgeführt. Für eine beispielhafte vergleichende Untersuchung wurde je ein Teilbereich 512 x 512 Pixel von Kanal-7 der Szene 217/39 von Juli und November mit High-Pass Filtern addiert, skaliert, relativ geometrisch korrigiert, kontrastverstärkt und gleichen photographischen Entwicklungsprozessen unterworfen (Abb.55a+b). Anschließend wurde für beide Aufzeichnungen eine Lineamentkartierung durchgeführt (Abb.56a+b), und die erfaßten Elemente nach Gesamtlänge und Anzahl in Kluffrosen dargestellt (Abb.57a,b,c,d).

Deutlich sind der, im vorangegangenen Kapitel bereits angesprochene, geringere Tonwertumfang sowie die größeren Schlagschatten in stark reliefierten Bereichen der Novemberdaten erkennbar. Ebenso deutlich ist zu sehen, daß in feintexturierten Regionen, wie z.B. im Randbereich der zentral gelegenen Muldenstruktur die Erosionsmuster aufgrund des hohen Sonnenstandes (Tab. 4) und der damit fehlenden Schattenbildung in den Julidaten nicht abgebildet werden. Letztere Erscheinung ist teilweise auch durch den Sonnenazimut beeinflusst.

Aus den Abbildungen und den erstellten Lineamentrosen wird deutlich, daß Lineamente parallel zur Einstrahlungsrichtung unterrepräsentiert sind, wobei solche senkrecht zum Sonnenazimut stärker in den Vordergrund rücken. Der selektive Einfluß des Sonnenazimut macht sich insbesondere im November bemerkbar, was im wesentlichen auf ein Zusammenspiel mit der niedrigen Elevation zurückzuführen ist, wobei ein natürliches Überangebot bestimmter Richtungen nicht abgeschätzt werden kann.

Die Maxima bleiben relativ gesehen erhalten. Der Einfluß der Beleuchtungsbedingungen wirkt sich besonders auf Lineamente geringerer Größenordnung aus, wie aus einem Vergleich (Juli - November) der Kluffrosen, aufgetragen nach Gesamtlänge und Anzahl, ersichtlich ist.



Abb. 55a: Novemberraufzeichnung  
MSS-7; el 330 az 1440

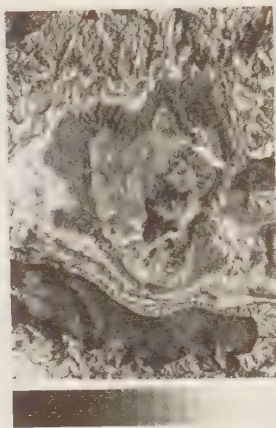


Abb. 55b: Juliaufzeichnung  
MSS-7; el 550 az 940



Abb. 56a: Lineamentauswertung  
der Nov. aufzeichnung



Abb. 56b: Lineamentauswertung  
der Juliaufzeichnung

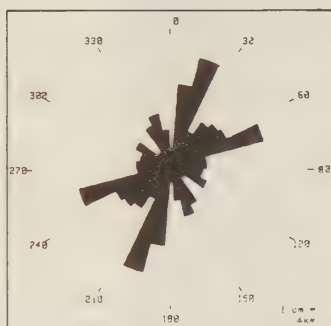


Abb. 57a: Richtungsverteilung  
der Nov.aufzeichnung  
nach Gesamtlänge

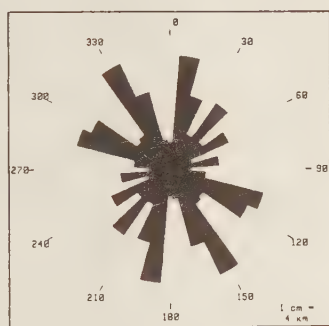


Abb. 57b: Richtungsverteilung  
der Juliaufzeichnung  
nach Gesamtlänge

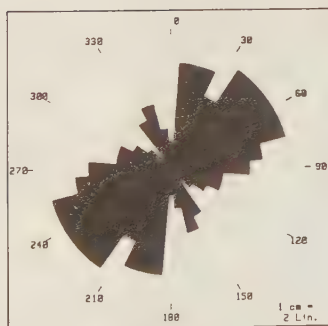


Abb. 57c: Richtungsverteilung  
der Nov.aufzeichnung  
nach Anzahl

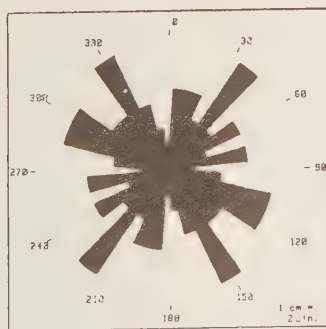


Abb. 57d: Richtungsverteilung  
der Juliaufzeichnung  
nach Anzahl



Abb.58a: Nov.aufzeichnung mit addiertem High-Pass Filter der Matrix  $31 \times 31$ . Pfeile verdeutlichen die, durch den Sonnenstand hervorgehobenen, größeren Strukturen



Abb.58b: Juliaaufzeichnung mit addiertem High-Pass Filter der Matrix  $31 \times 31$ . Pfeile verdeutlichen die, durch den Sonnenstand hervorgehobenen, größeren Strukturen

Ein im nördlichen Bildbereich von Abb. 55b durch Pfeile gekennzeichnetes Lineament liegt mit ca.  $125^\circ$  zwischen den Einstrahlungswinkeln von Juli und November, wird jedoch nur im Juli, bei Beleuchtung von "oben" sichtbar. Sein Erscheinungsbild als helle Linie läßt auf eine, schwach nach NNE fallende Geländestufe schließen, die durch einen günstigen Fallwinkel stark zum Sensor reflektiert, bei der Novembereinstrahlung jedoch keinen Kontrast zu seiner Umgebung, weder durch Schatten noch durch erhöhte Reflexion, erzeugt.

Einen ebenso eindrucksvollen Vergleich bieten Daten vom Juli und November, die mit einem Filter der Matrixgröße  $31 \times 31$  addiert worden sind (Kap. II.5.1.2.1.). An den hervorgehobenen größeren Strukturen sind die vorgenannten multitemporalen Effekte auffallend gut verdeutlicht (Abb. 58a+b).

Diese Beispiele zeigen, daß sowohl für eine Auswertung einzelner Strukturen, wie auch für statistische tektonische Erhebungen zumindest zwei Datensätze mit unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen herangezogen werden müssen, um aus dem gestaltlichen Gefüge einen vertretbaren Rückschluß auf funktionale Zusammenhänge ableiten zu können. Die Auswertung muß aufeinanderfolgend, ergänzend vorgenommen werden, da eine rechnerische Verknüpfung solcher Datensätze für diese Aufgabenstellung nicht geeignet ist.

Aufgrund der Orbitcharakteristik von LANDSAT sind multitemporale Daten nur mit einer Azimutvariation von ca.  $50^\circ$  für diese Breiten erhältlich, die auf der nördlichen Halbkugel um S-E, und in der südlichen Hemisphäre um NE liegen. Damit bleibt ein Großteil möglicher Beleuchtungswinkel unausgeschöpft. Die sich dadurch für eine umfassende photogeologisch-tektonische Auswertung ergebende Problematik, kann durch Vergleich mit Daten anderer, im optischen Bereich arbeitender Sensoren, z.B. MOMS, mit anderen Überflugzeiten und damit stark veränderten Beleuchtungsverhältnissen noch anschaulicher demonstriert werden (Abb. 65a+b) (Kaufmann et al., 1984,a).

Die Dringlichkeit hochauflösender, stereoskopisch akquirierender Systeme zur Lösung dieser Problematik ist damit angezeigt. (SPOT, Stereo-MOMS).

Für eine multitemporale Auswertung von spektral variierenden Phänomenen (z.B. Vegetation) bietet sich, in Abhängigkeit dieser Variationen, zwischen den Sonnwenden ( $21.6$  und  $21.12.$ ) der Erwerb von Frühjahr und Herbstdaten an, die vergleichbare Beleuchtungsbedingungen aufweisen und damit für eine digitale Verarbeitung und die folgende Interpretation die besten Voraussetzungen mit sich bringen.

### 5.3. Beurteilung der Emissionsdaten des HCMR

Die HCMR-Daten liegen sowohl als Tag/Nacht Aufzeichnungen, wie auch verteilt über mehrere Jahreszeiten vor. Die Aussagekraft von Tag- und Nachtaufzeichnungen wird in Kap. V.6./7. diskutiert. Die multitemporalen Aspekte beziehen sich auf den Vergleich jahreszeitlich verschiedener Tag- bzw. Nachtaufzeichnungen. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

Die groben Relationen in den Abstrahlungsintensitäten verschiedener Gesteinskörper bleiben im Tag- wie im Nacht-IR

verteilt über die Jahreszeiten, erhalten (Haydn et al, 1982,a). Dennoch unterliegen Thermaldaten aufgrund von Parametern wie dem Mikroklima, z.B. Oberflächenwinden, weit größeren multitemporalen Signalvariationen als Daten aus dem reflektiven Spektrum.

Das Aufspüren thermaler Anomalien durch Vergleich oder Verknüpfung multitemporaler Nachtaufnahmen (bei vorangegangener, unterschiedlich starker Einstrahlung) führte im Arbeitsgebiet nicht zum Erfolg. Andere Investigatoren (Watson et al., in Short & Stuart, 1982), deren Korrelierungsversuche mit bekannten Wärmeanomalien fehlschlagen, führten dies auf die geringe Bodenauflösung zurück, wobei temperatursgleichende Oberflächenwinde und ein schlechtes Signal/Rausch Verhältnis zudem eine nicht unwichtige Rolle spielen dürften.

Mit Ausnahme der orl-2 Serie und des Wassers im Stausee von Quarzazate zeigen die photogeologischen Einheiten in allen Tag-IR Aufzeichnungen stets höhere Temperaturen als in den Nachtaufnahmen. Diese geringsten Temperaturschwankungen im Tagesgang sind beim Stausee auf die Wärmespeicherkapazität des Wassers, bei der Ton-Siltstein Serie auf die geringe Einstrahlung bei Tag (Lage an der Steilstufe nördl. des Jbel Bani) und den Temperatursgleich durch mögliche Oberflächenwinde bei Nacht, zurückzuführen.

Der Sonnenazimut spielt im Vergleich zu LANDSAT-MSS eine geringe Rolle. Er bewegt sich von SE nach SW (nördl. Hemisphäre), wobei die Stärke der Emission am Tag und folglich auch in der Nacht von der gesamten Aufheizphase abhängig ist, und nicht wie bei LANDSAT-MSS eine Momentaufnahme der Reflexionsverhältnisse darstellt. Die verschiedenen Azimutwinkel zum Aufnahmezeitpunkt (Tab. 10) haben somit nur einen untergeordneten Einfluß auf jahreszeitlich verschiedene Aufnahmen. Steile, nach Norden fallende Schichtstufen (Jbel Bani) zeigen dabei im Schattenbereich stets eine geringere Emission.

| Datum    | ID-Nummer       | el  | az   |
|----------|-----------------|-----|------|
| 18.05.78 | A0022-14190-1/2 | 650 | 2610 |
| 06.09.78 | A0133-13460-1/2 | 590 | 2470 |
| 12.01.79 | A0261-13280-1/2 | 340 | 2200 |
| 24.02.79 | A0304-13300-1/2 | 460 | 2290 |

Tab. 10: Sonnenstandangaben jahreszeitlich verschiedener Aufnahmen derselben Szene von HCMM.

Einen entscheidenden Einfluß dagegen hat die Sonnenelevation. Bei zu flachen Einfallswinkeln, z.B. am 12.01.79 (Tab.10) kommt es zu ausgeprägten Reliefeffekten. Die Emission wird zu

einer Funktion der Hangexposition, die auch des Nachts erhalten bleibt, wobei das Bildmaterial eine Ähnlichkeit zu Daten aus dem reflektiven Spektrum aufweist. Dieser Effekt ist in der Aufnahme vom 24.02.79 kaum noch wahrnehmbar, so darf angenommen werden, daß Aufnahmen ab ca 500 el. (Wert zum Aufnahmezeitpunkt) weitgehend frei sind von expositionsspezifischen Abstrahlungen. Da Thermaldaten mit geringer Bodenauflösung für strukturgeologische Auswertungen prinzipiell wenig geeignet sind, sollten für Signatur- bzw. lithologische Untersuchungen analog zu LANDSAT MSS, Daten mit hohem Tagessonnenstand gewählt werden, die gleichzeitig ein besseres Signal/Rausch Verhältnis aufweisen.

## 6. Diskussion strukturgeologischer Einheiten

### 6.1. Beurteilung der MSS Daten

Wie die beispielhafte multitemporale Auswertung in Kap. V.5. gezeigt hat, sind für eine umfassende strukturgeologische Auswertung wenigstens zwei Datensätze, aufgenommen unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen, erforderlich. Für die Lineamentkartierung wurden S/W IR-Kanäle, auf Grund des minimalen Streulichteinflusses und damit stärksten Kontrastes verwendet. Durch zusätzliche Addition mit High-Pass Filtern können, je nach Matrixgröße, Strukturen unterschiedlichen Ausmaßes hervorgehoben werden.

Erosionsrinnen spiegeln durch Schwerkraft geprägte, auf das niedrigste Höhengniveau ausgerichtete Muster wider; Gänge treten, wie im Bereich Zenaga meist als erhabene Strukturen mit entsprechend ausgebildeten Schuttfächern hervor. Eine genetische Einordnung von Lineamenten im Gelände ist auf Grund der fehlenden Synopsis nur in seltenen Fällen möglich.

Zur Kartierung des Gewässernetzes ist im Bereich des Testgebietes ein Falschfarbenbild (Abb. 36) am besten geeignet, da deutlich hervortretende Vegetationsflächen eine große Hilfe als Indikatoren darstellen. Eine nähere Betrachtung der Gewässernetzkarte im Vergleich zur geologischen Karte 1:200 000 veranschaulicht jedoch den selektiven Einfluß des Reliefs auf die Auswertung. Die starke Zertalung im Bereich der Ton-Siltstein, Dolomit Abfolgen (mittlerer Bildbereich) läßt ein feinverästeltes Gewässernetz vermuten, eine kartographische Erfassung ist jedoch nicht möglich. Dieses Mißverhältnis in der Auswertbarkeit von ebenen und stark reliefierten Regionen bleibt auch bei Daten mit 30x30m<sup>2</sup> Bodenauflösung (Thematic Mapper Kap. VI.) erhalten.

Morphometrische Analysen zu Entwässerungsdichten oder Horton'schen Gesetzen (List, 1969) können bei Verwendung von MSS Daten in morphologisch inhomogenen Gebieten zu keinem brauchbaren Ergebnis führen. Auch die stereoskopisch auswertbaren MSS-Daten bringen keine wesentlich deutlichere Ansprache des Gewässernetzes mit sich, sind jedoch neben dem Verteilungsmuster der Wasserläufe für die Festlegung der Wasserscheiden verwendbar.

Mit ihrer Hilfe sind auch die, in der Strukturkarte darge-

stellten Kategorien, die auf monoskopischen Daten nur über Schattenwurf, Erosionsformen, Entwässerung und umlaufendes Streichen abgeschätzt werden können, besser erfaßbar. Die Kartierung von Störungen beschränkt sich, der Luftbildauswertung vergleichbar, vorrangig auf steilstehende Flächen, da flach einfallende Trennflächen wie z.B. Auf- oder Abschiebungen schon bei geringer Morphologie oft nicht mehr als gerade Linie abgebildet werden und eine Identifizierung nur in Ausnahmefällen (Bodechtel & Nithack, 1974) möglich ist. Versatzbeträge sind am besten in Farbkompositen kartierbar, da auf diesen zersicherte lithologische Einheiten durch ihr spektrales Erscheinungsbild am deutlichsten hervortreten.

Schichtköpfe sind durch ihr morphologisches Erscheinungsbild klar anzusprechen. Die wesentlichen Kriterien sind die Wechsellagerung kompetenter und inkompetenter Schichten, bügeleisenförmige Erosionsformen (engl. flat irons) und die Lagebeziehung zu den Nachbargesteinen (Abb.47 G-H, 5-9 / P-R, 4-8). Sie sind in allen Regionen gut kartierbar und ein charakteristisches Merkmal für die Trennung magmatischer Gesteine von solchen sedimentären Ursprungs. Die einzige Problematik im Testgebiet ergab sich für die stark verfestigten Konglomeratabfolgen. Ihre Zusammensetzung aus vorwiegend präkambrischen Rhyolithen und Andesiten, das geringe Reflexionsvermögen und das teils flächige Vorkommen (Abb.47 F-H, Ø-1), können leicht zur photogeologischen Fehlinterpretation führen.

Es bleibt zu erwähnen, daß mit Hilfe geplanter, stereoskopisch aufzeichnender Systeme wesentliche Verbesserungen für die strukturgeologische Kartierung zu erwarten sind. Im Vordergrund stehen eine Verringerung der Unsicherheitsfaktoren und die quantitative photogrammetrische Auswertung.

## 6.2. Beurteilung der HCMR-Daten

Die Thermaldaten der HCMM sind aufgrund ihres Charakters und der geringen Auflösung für strukturgeologische, insbesondere der Lineamentkartierung weniger geeignet. Dennoch waren von einer Arbeitsgruppe (Scarvic in NASA, 1982) bislang unbekannte überregionale Lineamente in Frankreich aus Tag und Nachtaufnahmen erfaßt worden. Ähnliche Ergebnisse konnten für den relativ begrenzten, ariden Bereich in Marokko nicht erbracht werden.

Im bearbeiteten Gebiet wurden weder in den Tag- noch in den Nachtaufnahmen Lineamente oder Strukturen beobachtet, die sich nicht bereits in den LANDSAT-MSS Daten klar abzeichneten. Die in den verschiedenen Datensätzen auftretenden "Lineamente" waren, falls nicht durch feine Wolkenbänken oder Oberflächenwinde (wind streaks) verursacht, im wesentlichen auf folgende Oberflächenerscheinungen zurückzuführen:

- helle Lineamente im Tag-IR sind fast ausschließlich durch die starke Emission von Lockermaterialien wie Talfüllungen oder auskeilenden Sedimentbänken, mit geringer Verwitterungsresistenz verursacht.

- dunkle Lineamente im Tag-IR werden überwiegend durch Schlag-schatten oder ausbleibende, verwitterungsresistente Gesteins-einheiten, umgeben von Lockermaterialien und Vegetationsvor-kommen in Wadis und Tälern hervorgerufen.

- helle Lineamente im Nacht-IR sind auf ausbleibende, anstehen-de Gesteins-einheiten und möglicherweise sporadisch erhöhte Bodentemperaturen in Tälern (z.B. Füllung des Porenraumes der Lockersedimente mit Wasser und damit steigende Wärmekapazität) zurückzuführen.

- dunkle Lineamente im Nacht-IR werden durch Lockermaterialien und Vegetation verursacht.

- aus LANDSAT-MSS kartierte Lineamente größeren Ausmaßes sind in den Thermalaufzeichnungen nur dann zu erkennen, wenn sie von starkem Schattenwurf (Tag-IR dunkel) oder von Lockerma-terialien (Tag-IR hell) begleitet sind.

Eine definitionsgemäße Lineamentkartierung auf gering auflö-senden HCM-Thermaldaten führt bezogen auf die höher auflösen-den LANDSAT-MSS Daten, mit wenigen Ausnahmen zu lithologi-schen oder Vegetationseinheiten.

## 7. Diskussion lithologischer Einheiten

### 7.1. Beurteilung der MSS Daten

Zur Differenzierung lithologischer Einheiten (Abb. 47) auf MSS Daten werden spektrale Signaturen und die Albedo, Strukturen, Texturen sowie die Lagebeziehung verwendet. Eine Trennung von Magmatiten und Sedimentgesteinen ist mit Hilfe von Strukturen und der Lagebeziehung möglich (Kap. V.6.) Die Abgrenzung der Lockermaterialien von anstehenden Gesteinen kann über die Textur durchgeführt werden, wobei das spektrale Erscheinungs-bild der Schutt- und Schwemmfächer auf das Erosionsgebiet schließen läßt.

Die Kartierung und photogeologische Einordnung der Sedimentge-steine wurde vorwiegend nach spektralen Kriterien durchge-führt. Für die exakte Grenzziehung war die Albedoinformation von Nutzen. Beides war am besten durch Farbkompositen zu bewerkstelligen, wobei Ratio- und Hauptachsenbilder als Zu-satzinformationen herangezogen worden sind. So war die eindeu-tige Differenzierung einzelner Serien (z.B. Ki1, G-I, 6-7) nur mit Hilfe von Reduktionsverfahren (Abb. 25 b,c / 27 b) oder deren Kombination (Abb. 38) möglich.

Die im wesentlichen aus inkompetenten Schichten aufgebauten, stratigraphisch eigenständigen Serien Ad3a und Ad2a im südli-chen Bildbereich, konnten durch keines der photogeologischen Kri-terien voneinander getrennt werden. Ebenso war eine Diffe-renzierung der prä- und infrakambrischen Konglomerate nicht möglich. Dagegen konnte die Serie Ad1 gegenüber der geologi-schen Karte 1:200 000 mittels spektraler Variationen in mehre-re lithologisch-faziell unterschiedliche Einheiten gegliedert werden (J-N, 2-6). Gleiches gilt für die Serien Ki3 (R-T, 0-2)

und Ks2 (K-O, 8-9). Östlich und nördlich des Trachytkomplexes bei Adrar N-Tirtirt konnte eine bislang nicht ausgehaltene Einheit spektral erfaßt werden. Nach mündlicher Mitteilung durch R. Siegert, Erlangen, handelt es sich um Konglomerate mit vorwiegend quarzitischen Komponenten.

Das Testgebiet ist charakterisiert durch erhebliche Mächtigkeitsschwankungen und Faziesänderungen in der Nord-Süd Achse (Buggisch et al., 1979). Hinzu kommt das bereits angesprochene, vermehrte Auftreten verdorrter Buschvegetation gegen den nördlichen Bildbereich. Besonders stark bemerkbar macht sich der Fazieswechsel bei der Serie Ad2b. Neben der zunehmenden Maskierung durch die Vegetation ist ein Anstieg der grobklastischen Komponenten und der Krustenbildung zu beobachten (vgl. J-L, 2-5/G-H, 5-6/ B,Ø). Dies führt zu spektralen Veränderungen und einer erheblichen Reduzierung der Albedo. Die Kartierung konnte für diesen Fall nur über das Kriterium der Lagebeziehung, durchgeführt werden, gestützt auf eine nur mäßig veränderte lithologische resp. spektrale Ausprägung der Nachbargesteine und den kalkulierbaren Einfluß der Vegetation (Kap. V.4.).

Im Gegensatz zur Sedimentgesteinskartierung war eine Differenzierung der unterschiedlichen, vorwiegend im nördlichen Bildbereich auftretenden Effusiva weit schwieriger. Das fehlende Kriterium der Lagebeziehung beschränkte die Beurteilung auf spektrale und untergeordnet auf textuelle Kriterien. Während die Kartierung der Sedimentgesteine eine gute Übereinstimmung mit der geologischen Karte 1:200 000 ergab, und in einigen Bereichen sogar eine exaktere Grenzziehung, bestätigt durch die Geländebegehung, möglich war, treten im Bereich der Magmatite größere Abweichungen auf. Die Ursache liegt in dem sehr engräumigen Wechsel von Andesiten und Rhyolithen mit Tuffen und Tuffiten, sowie einer oft inhomogenen Ausbildung derselben. Diese Problematik kommt auch in z.T. widersprüchlichen Darstellungen geologischer Karten von unterschiedlichem Maßstab zum Ausdruck. Hier lassen die, im Ausblick vorgestellten Daten aus anderen Spektralbereichen weit bessere Differenzierungen erwarten.

## 7.2. Beurteilung der HCMR-Daten

Die Tag-Nachtaufzeichnungen des Thermalscanners zeigen in groben Zügen eine Umkehrung der relativen Emissionsmaxima der meisten auftretenden Gesteinsserien, wobei die Tagestemperaturen im Mittel um den Faktor 2-3 höher liegen. Feinkörnige Lockermaterialien weisen die stärksten Emissionen am Tag und geringe Emissionen in der Nacht auf. Im Gegensatz dazu haben anstehende Gesteinskomplexe aufgrund ihrer höheren Wärmespeicherkapazität niedrige Tages- und hohe Nachttemperaturwerte. Die stärksten Temperaturdifferenzen treten bei Quarziten, verfestigten Sandsteinen und Karbonaten auf.

Bedingt durch die geringe Bodenauflösung sowie die Charakteristik der Daten ist eine Zuordnung zum Gelände oft erschwert und eine Beurteilung auf großflächige Areale begrenzt. Bezogen

auf den gesamten Bildinhalt liefert das Tag-IR (Abb. 28a) die häufigeren und stärkeren Differenzierungen gegenüber der Nacht-IR Aufnahme (Abb. 28b). Die zusätzlichen Differenzierungen des Tag-IR im Vergleich zu den LANDSAT-MSS Daten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Serie Ad1 (Dolomite, Ton- Siltsteine) ist von den angrenzenden jüngeren Abfolgen Ad2 und Ad3 (Sand-, Siltsteine, Mergel, Kalke) durch geringere Emissionen sehr deutlich abgegrenzt (M-J, 2-5).

Quarzite heben sich durch sehr niedrige Temperaturen deutlicher von ihrer Umgebung ab. Dies gilt für den Jbel Bani, insbesondere aber für isolierte Vorkommen wie z.B. bei H,1.

Die Differenzierung von Gesteinen magmatischen Ursprungs erscheint in vielen Bereichen besser durchführbar. Die Ursache ist primär im unterschiedlichen  $\text{SiO}_2$  -Gehalt zu finden (Short & Stuart, 1982). Ein direkter Bezug zum Modalbestand wie auch zu den Dichtewerten konnte jedoch nicht hergestellt werden. Die Begründung liegt in der zu geringen Bodenauflösung und insbesondere in der Oberflächenausbildung. Letztere kann einen erheblichen Einfluß bewirken, da geringmächtige Auflagen von Lockermaterialien das thermische Verhalten stark modifizieren.

Eine Trennung der Lockermaterialien vom anstehenden Gestein ist sowohl im Tag- wie auch im Nacht-IR möglich. Dieses unterschiedliche Verhalten und die Tatsache, daß die thermale Information einen Rückschuß auf die oberen cm-Bereiche zuläßt, ermöglichen z.B. die Trennung der Pedimentflächen nördl. des Jbel Bani von den Bereichen der mächtigen Schuttfächer. Die höhere Wärmespeicherkapazität der, die Pedimentflächen bildenden Ton- Siltsteinserien (or1-2) läßt die aufgelagerten geringmächtigen Schuttmaterialien nachts wärmer erscheinen als die angrenzenden mächtigen Ablagerungen von Lockermaterialien. Eine solche Differenzierung ist bei MSS über die Textur nicht möglich. Dieses Beispiel kann besonders anschaulich anhand der Überlagerung von Abb. 40 demonstriert werden, wo die Thermal-daten vor dem Hintergrund der hochauflösenden LANDSAT-MSS Daten weit zuverlässiger zu beurteilen sind als gesondert für sich.

Tabelle 11 zeigt zusammenfassend, die zur Kartierung der besprochenen lithologischen Einheiten am besten geeigneten, nach unterschiedlichen Methoden optimierten Bildprodukte.

| Litholog.<br>Einheit     | RATI0 |     |     |     |     |     |  | Hauptkom-<br>ponenten<br>II . III | Farbkom-<br>ponenten<br>H . S |   | Farbkompositen<br>S ↑ . Rat . Merge |   |   | Thermal-IR   |   |
|--------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|--|-----------------------------------|-------------------------------|---|-------------------------------------|---|---|--------------|---|
|                          | 4/5   | 4/6 | 4/7 | 5/6 | 5/7 | 6/7 |  |                                   |                               |   |                                     |   |   | Tag . Nacht: |   |
| δ <sub>2</sub> H         |       |     |     |     |     |     |  |                                   |                               |   | X                                   | X |   |              | X |
| or5b                     |       |     |     |     |     |     |  |                                   |                               |   |                                     | X |   |              |   |
| or4                      |       |     | X   |     | X   | X   |  |                                   |                               |   |                                     |   | X |              |   |
| or1-2                    |       |     |     |     |     |     |  |                                   |                               |   |                                     | X |   |              | X |
| Ks2b                     |       |     | X   |     |     |     |  | X                                 |                               |   |                                     |   | X |              |   |
| Ks2a                     |       |     | X   |     |     |     |  | X                                 |                               | X | X                                   |   |   |              |   |
| Ks1                      |       |     | X   |     |     |     |  | X                                 |                               | X | X                                   |   |   |              |   |
| Ki3                      |       |     | X   |     |     |     |  | X                                 |                               |   |                                     | X |   |              |   |
| Ki1                      |       |     | X   |     |     |     |  | X                                 |                               | X | X                                   |   |   |              |   |
| Ad3b                     |       |     | X   |     |     |     |  | X                                 |                               |   |                                     | X |   |              |   |
| Ad2b                     |       |     |     |     |     |     |  |                                   | X                             |   |                                     |   |   |              |   |
| Ad1                      |       | X   |     |     |     |     |  | X                                 |                               | X | X                                   |   |   | X            |   |
| γ- Δ Ad                  |       |     | X   |     |     |     |  | X                                 |                               |   |                                     |   |   |              |   |
| αXIII <sub>s</sub> /Ad1a |       |     |     |     |     |     |  |                                   |                               | X |                                     |   |   |              |   |
| αXIII <sub>m</sub>       |       |     | X   |     |     |     |  | X                                 |                               |   | X                                   |   |   | X            |   |
| πXIII <sub>m</sub>       |       |     | X   |     |     |     |  | X                                 |                               |   |                                     | X |   | X            |   |
| qXII                     |       |     | X   |     |     | X   |  | X                                 |                               |   |                                     |   |   | X            |   |
| γI                       |       |     | X   |     |     |     |  | X                                 |                               | X | X                                   |   |   |              |   |
| γI                       |       |     |     |     |     | X   |  |                                   |                               | X | X                                   |   |   |              |   |

Tab. 11: Gegenüberstellung lithologischer Einheiten des Testgebietes und der zur Kartierung am besten geeigneten Bildprodukte (X). H = Abb.33b; S = Abb.33c; S↑ = Abb.36; Rat = Abb.38; Merge = Abb.40.

1. Sensoren der 2. Generation

Seit kurzem stehen Daten neuer Sensoren mit höherer Bodenauf-  
lösung, zusätzlichen Spektralbändern und modernerer Technolo-  
gie zur Verfügung (Kap. I.2). Die Erfahrungen und ersten Ergeb-  
nisse mit Thematic Mapper und MOMS Daten sollen hier vorge-  
stellt werden.

1.1. LANDSAT-Thematic Mapper (TM)

Abb. 59 a+b zeigen korrespondierende Szenenausschnitte ver-  
gleichbarer Kanäle von MSS und TM, aufgezeichnet unter ähnli-  
chen Beleuchtungsverhältnissen. Deutlich erkennbar ist der  
vermehrte Detailreichtum bei TM, hervorgerufen durch die  
höhere Bodenauflösung. Der Tonwertumfang ist größer, bedingt  
durch einen erweiterten Dynamikbereich bei TM von 8 bit gegen-  
über MSS (6 bit). Verbessert ist auch die Geometrie der Daten,  
wie Vergleiche MSS/TM mit existierendem thematischen Karten-  
material gezeigt haben.

Die Pfeile zeigen zwei, sich kreuzende Landepisten nördlich  
des Jbel Azegza. Sie sind in beiden Datensätzen erfassbar,  
jedoch eindeutig identifiziert werden können sie nur in den  
stärker auflösenden TM-Daten. Dieses Beispiel weist auf die  
Problematik und die Anforderungen anderer Disziplinen hin. Für  
die geologisch orientierte Auswertung bringt die höhere Auflö-  
sung und damit verbundene Reduzierung der Mischsignaturen eine  
exaktere Grenzziehung und die Möglichkeit zur Erfassung auch  
feiner Strukturen mit sich. Eine präzisere, meist kategorische  
Identifizierung von Oberflächen liegt mehr im Bereich der  
spektralen Auflösung und Auslegung zu verwendender Kanäle.

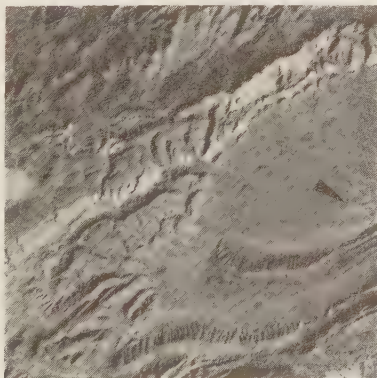
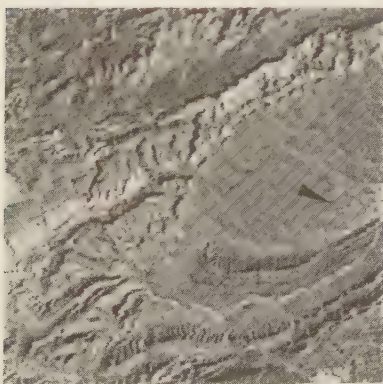


Abb. 59a: MSS Band 7,  $\varnothing$ .8-1.1 $\mu$ m  
Bodenaufl. 79x79m<sup>2</sup>  
el. 31° az. 140°, 29.1.82  
Maßstab ca. 1: 200 000

Abb. 59b: TM Band 4,  $\varnothing$ .76-0.9 $\mu$ m  
Bodenaufl. 30x30m<sup>2</sup>  
el. 31° az. 139°, 28.1.83

Neben der verbesserten Bodenauflösung, liegt der wesentliche  
Fortschritt in den zusätzlichen Kanälen des TM (Tab. 3).

Mit LANDSAT-MSS Daten ist eine Erfassung eisenoxydhaltiger Gesteine sowie die Identifikation und Beurteilung von Vegetationsflächen möglich. Beide Vorkommen lassen sich zumeist durch einfache Ratiotechniken bildlich verdeutlichen. Um eine Differenzierung limonitischer Gesteine untereinander zu erreichen bzw. andere lithologische Einheiten voneinander zu trennen, bedarf es sensibler und aufwendiger Verfahren.

Die neuen sogenannten SWIR-Bänder von TM, zentriert bei 1.65µm und 2.2µm, bieten mehr diagnostisch spektrale Informationen über die Zusammensetzung von Gesteinen als der sichtbare- und der nahe Infrarot Abschnitt. Der Bereich um 1.65µm (Band 5) beinhaltet die stärksten Reflexionen (bis 70%) der meisten, insbesondere umgewandelter, Tonminerale führender Gesteine, unabhängig von der  $\text{Fe}^{2+3+}$  Absorption (Goetz & Rowan, 1981). Dies wird auch bei Vergleich der Originalkanäle bzw. deren Histogrammen deutlich. Im Gegensatz dazu zeigen Schichtsilikate wie Tone und Glimmer aber auch Carbonate scharfe diagnostische Absorptionsbänder im 2.2µm Bereich (Band 7). Dieser Umstand kann genutzt werden, um Zonen hydrothermalen Alterationen aufzuspüren, die wiederum mit Mineralisationen in Verbindung stehen können. Abb. 60 zeigt ein Ratio berechnet aus Kanal 5 über 7. Erkennbar ist das ausgeglichene Spektralverhalten der meisten Gesteinsserien am einheitlich grauen Grundton. Helle Bereiche im Bild signalisieren das vermehrte Auftreten von Schichtsilikaten (schmale Pfeile) und Vegetationsflächen (breite Pfeile). Letzte weisen in diesen Kanälen einen ähnlichen Spektralverlauf wie Tonminerale auf, sind aber durch andere Kanalkombinationen z.B. in Verbindung mit TM Kanal 4 klar abzutrennen.

Die hellen Anomalien treten in Bereichen alkalischer Rhyolithe und Tuffe ( $\pi$ XIIIa) (1), von Rhyolith-Ignimbrit Sequenzen ( $\pi$ XIIIa) (4), dazitischer Ignimbrite ( $\pi$ XIIIb) (2) sowie bei Serpentin (σII) (6), Alkali-Graniten (über MSS nicht gehalten) (3) und Doleriten ( $\delta_2$ H) (5) auf. Die Serie  $\pi$ XIIIa steht mit Mn-Vererzungen in Verbindung, die Serpentine mit Co/Ni und Cr-Mineralisationen. Serpentine sind Phyllosilikate, deren kaolinitähnlicher Aufbau für das Spektralverhalten verantwortlich sein dürfte. Bei Rhyolithen kann die Ursache in der Kaolinitisierung der Feldspäte durch Hydrolyse oder deren Umwandlung in Sericit und Chlorit zu finden sein. Die mit zersetzten Tuffen in Verbindung stehenden Sequenzen könnten durch größere Vorkommen von Montmorillonit (Bentonit) geprägt sein.

Die Anomalien sind, Serpentine und Dolerite ausgenommen, nie auf das gesamte Vorkommen verteilt sondern auf Teilbereiche beschränkt. Eine detaillierte Korrelation war bislang nicht möglich, da in dem kurzen Zeitraum keine, auf das TM Datenmaterial ausgerichtete Geländebegehung stattfinden konnte. Mit Ausnahme der Serpentine und Dolerite ist eine Abgrenzung der abgebildeten Anomalien mit keiner anderen Datenkombination aus dem "optischen" Bereich möglich. Auch Vergleiche mit vorhandenen geologischen Karten können nicht zur weiteren Klärung beitragen, da es sich um diagnostische, lithologische Erscheinungen handelt, ohne direkten Bezug zur Stratigraphie. Ausführliche Untersuchungen zu diesem Sachverhalt, unter Einbe-

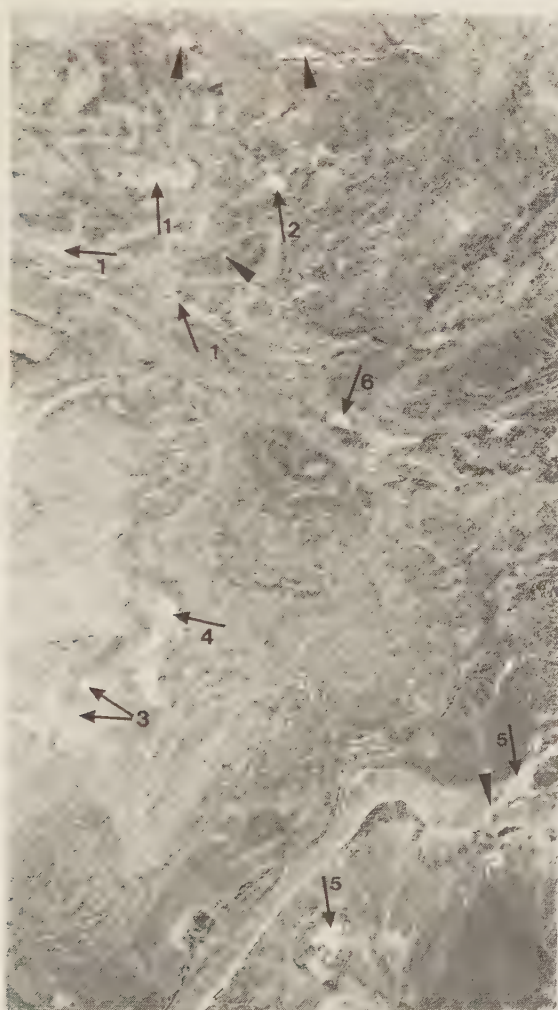


Abb.60: Ratio der TM- SWIR Kanäle 5/7. Die hellen Anomalien (hohe Werte in B 5, niedrige Werte in B 7) sind verursacht durch das Spektralverhalten von Tonmineralen (schmale Pfeile) und Vegetationsflächen (breite Pfeile)

ziehung von Verwitterungseffekten, werden vom Autor im Rahmen einer Pilotstudie der DFVLR, für diese Region durchgeführt.

Neben dem aufgezeigten diagnostischen Ansatz durch Verwendung der neuen SWIR-Kanäle, bieten der neu hinzugekommene blaue

Spektralbereich (Band 1) und der Thermalkanal (Band 6) Möglichkeiten für zusätzliche Oberflächendifferenzierungen.

Der Anwendungsbereich des Thermalkanals (Band 6) ist jedoch stark eingeschränkt. Einmal ist die angegebene Empfindlichkeit um fast ein  $\mu$  auf  $10.4 - 11.6\mu\text{m}$  reduziert (kurze Mitteilung der NASA), wobei ein geologisch interessanter Bereich (gehäuftes Auftreten gesteinspezifischer Spektralvariationen) gegen  $12.5\mu\text{m}$  liegt. Zum anderen fallen die Aufnahmezeitpunkte von LANDSAT in die vormittägliche Aufheizphase und nicht in das Tagestemperaturmaximum. In Gebieten mit stark bewegter Morphologie kommt es zu dieser Tageszeit, jahreszeitlich bedingten, niedrigen Sonnenständen vergleichbar, zu expositionsabhängigen Erwärmungen, deren Abbildungen reflektierten Signalen ähneln und für eine Auswertung wenig erfolgversprechend sind. Die Verwendbarkeit des Thermalkanals bleibt so im wesentlichen auf ebene Gebiete beschränkt.

Der im blauen Bereich aufzeichnende Kanal, kann z.B. in Kombination mit dem grünen und roten Wellenlängenbereich zur Echtfarbenwiedergabe der Erdoberfläche genutzt werden. In Verbindung mit verschiedenen Infrarotkanälen (NIR, SWIR) ist eine bessere Differenzierung von anstehenden Gesteinsoberflächen und Lockermaterialien, insbesondere aber von anthropogenen Objekten möglich.

Abb. 61 zeigt ein Ratio von Kanal 1 zu 7. Diese Kombination ermöglicht die deutlichste Abgrenzung der meisten auftretenden Gesteinsserien (mittels der stärksten Spektralvariationen) wie auch aus der Korrelationsmatrix (Tab. 12) abgeleitet werden kann. Das Ausmaß der Variationen dieser zweikanaligen Komponente wird durch einen Vergleich mit den sechs möglichen MSS-Ratios (Abb. 25 a-f) besonders augenfällig. Dies betrifft auch die Häufigkeit der Variationen. Ebenso sind in dieser Ratioverarbeitung, durch Verwendung eines SWIR-Kanals, lithologische Differenzierungen enthalten, die mit dem menschlichen Auge nicht erfaßt werden können und folglich auch in geologischen Karten nicht dargestellt sind. Betroffen sind Sedimentgesteine (vgl. Abb. 47. G-H, 5-6) und in besonderem Maße Gesteine magmatischen Ursprungs (nördlicher Bildbereich).

Abb. 62a+b zeigen je eine Ratiokombination vergleichbarer Spektralkanäle, aufgenommen unter ähnlichen Beleuchtungsverhältnissen von MSS (4/5) und TM (2/3) aus der östlich an das Arbeitsgebiet anschließenden Region El Graara, die größtenteils aus präkambrischen Magmatiten und Metamorphiten aufgebaut ist. Beide Abbildungen sind aus einer Anzahl von  $512 \times 512$  Bildelementen aufgebaut. Aufgrund der geringeren Bodenpixelgröße von MSS ist der entsprechende Geländeausschnitt zu TM verkleinert abgebildet (Rahmen). Die Gegenüberstellung von MSS/TM macht deutlich, daß das spektrale Erscheinungsbild im sichtbaren grünen und roten Wellenlängenbereich beider Sensoren, abgesehen von der verbesserten Auflösung von TM, vergleichbar ist. Eine spektrale bzw. lithologische Trennung einzelner Gesteinskomplexe ist nur bedingt möglich. Die Verarbeitung der vergleichenden Kanäle aus dem sichtbaren und NIR-Bereich bringen keine vermehrten Differenzierungen. Kanalkom-

binationen, die einen der SWIR-Kanäle mit einbeziehen, zeigen dagegen eine Fülle von Details, die in neueren geologischen Karten dieser Region vom Maßstab 1:100 000 oft nur generalisiert dargestellt sind oder gänzlich fehlen.



Abb.61: Ratio aus den TM Kanälen 1/7. Vergl. MSS Ratios Abb.25

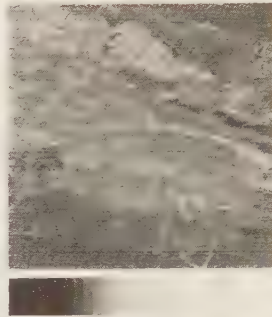
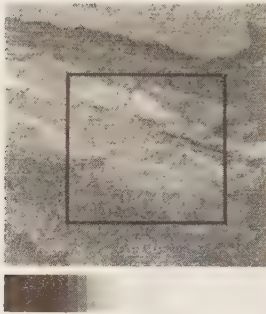


Abb. 62a: MSS Ratio 4/5  
Der Bereich in  
der Umrandung entspricht  
dem Ausschnitt der TM  
Abbildungen 62b und 63  
(Kaufmann et al. 1984a)

Abb. 62b: TM Ratio 2/3

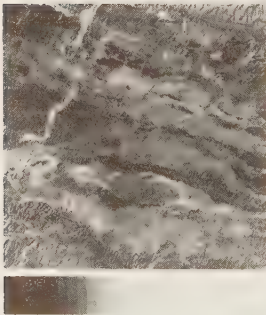


Abb. 63: Ratio aus TM 4/5  
Identischer Gelände-  
ausschnitt zu Abb.62b mit er-  
heblich verstärkten und ver-  
mehrten Spektralvariationen

Auf Abb. 63 ist exakt derselbe Geländeausschnitt wie in Abb. 62b mit einer Ratiokombination aus TM 4 / TM 5 (NIR / SWIR) wiedergegeben. Die Abbildung entspricht einem Maßstab von ca. 1:500 000. Neben einer Vielzahl spektraler Variationen tritt besonders eindrucksvoll der Doleritgang in Erscheinung, der den Anti-Atlas vom Jbel Bani im Süden bis über das Draa Tal im Norden durchsetzt. Er schwankt in der Mächtigkeit zwischen 50 und 100 m und ist im nördlichen Bildbereich an einer WNW-

ESE streichenden Störung um ca. 300 m versetzt. Die gefritten Zonen im Kontakt zu den Nachbargesteinen setzen der Verwitterung größeren Widerstand entgegen, so daß der Dike im Bereich der leicht erodierbaren Magmatite als erhabene Doppelstruktur abgebildet ist. Dieses Beispiel im Vergleich zu Abb. 62b verdeutlicht, daß die spektrale Signifikanz der SWIR Kanäle und deren Kombinationen nicht nur zur lithologischen Differenzierung sondern auch für strukturgeologische Fragestellungen einen erheblichen Beitrag leisten kann. Eine Korrelation der Spektralvariationen mit dem Gelände wird im Rahmen der bereits angesprochenen Pilotstudie durchgeführt.

Die relativ hohe Anzahl der Kanäle und die Fülle an Information bringt die Forderung nach neuen, anwendungsorientierten Verarbeitungskonzepten mit sich. Neue methodische Konzepten zur Verarbeitung und Darstellung hochauflösender Thematic Mapper Daten wurden von Haydn (1983) an einem der ersten Datensätze der NASA entwickelt und am Beispiel einer Szene vom Death Valley, Ca., U.S.A. vorgestellt. Die in Kapitel II gezeigten Verarbeitungsmethoden und Konzepte sind generell auf TM übertragbar. Dennoch treten neue Probleme, verursacht durch den Sensor selbst, die Vorverarbeitung der Bodenstationen und die Datenqualität auf. Der Ausfall einzelner Detektoren, behoben durch Duplikation von Nachbarzellen, ist in einzelnen Kanälen nicht erkennbar. Bei Reduktionsverfahren (z.B. Ratios) treten diese Fehler sehr stark in den Vordergrund (Abb. 60). Der 6 Scanlinienseffekt von MSS ist bei TM auf einen 16 Scanlinienseffekt angewachsen und mit derzeit am Institut verfügbaren Programmen nicht zu beheben. Alle vorgestellten Ratiobilder von TM sind mit mehr oder weniger starker Streifenbildung behaftet.

Ein weiterer Mangel besteht in der nicht mehr gewährleisteten Linearität der Daten. Berechnete Scattergramme von Kanalkombinationen mit SWIR Daten zeigen keinen geradlinigen (z.B. Abb. 12) sondern einen mehr oder weniger stark gekrümmten Verlauf. Dies hat zur Folge, daß Ratio- und Hauptachsenbilder mit SWIR Kanälen noch Reliefstrukturen zeigen (Abb. 60, 61, 63), die Beleuchtungsverhältnisse also nicht allein durch additive Konstanten sondern nur durch zusätzliche aufwendige logarithmische bzw. exponentielle Transformationen kompensiert werden können.

Als eine der Ursachen ist die unterschiedliche Empfindlichkeit der sichtbaren und des nahen Infrarotkanals gegenüber den SWIR Kanälen in Betracht zu ziehen. Die aufgezeichnete Dynamik liegt im ariden Bereich bei SWIR Kanal 5 um Faktor 2, bei SWIR Kanal 7 um Faktor 1.5 höher als in den restlichen Kanälen. Zur Kontrastverstärkung der Kanäle 5 und 7 steht somit ein geringerer Spielraum zur Verfügung. Für eine Farbkombination z.B. aus Band 1, 4, 7 bedeutet dies, daß die über den Spektralauszug von Kanal 7 projizierte Farbe aufgrund höherer radiometrischer Auflösung und somit geringeren Kontrastes nur abgeschwächt abgebildet wird. Behoben werden kann dieser Umstand entweder durch geringere Kontrastverstärkung der beiden restlichen Kanäle, was einen Rückgang der Farbsättigung zur Folge hat oder durch Datenkompression der SWIR Kanäle um den entsprechenden Faktor, wobei eine Einbuße an Farbnüancierungen (feiner spektraler Unterschiede) in Kauf genommen werden muß. Um einen farblichen Eindruck der Spektralvariationen bei Ver-

wendung eines SWIR Kanals zu vermitteln, wurde ein Komposite aus den Kanälen 1,4,7, ausgewählt ob der niedrigsten Korrelationen (Tab.12), nach dem Schema der Sättigungsanhebung (Abb. 32, 34, 35) berechnet. Abb. 64 entspricht in der Konzeption Abb. 36. Die hier gegenüber Abb. 36 verstärkt auftretenden farblichen Nuancen und damit gegebenen Differenzierungsmöglichkeiten, sind zu einem geringen Anteil dem blauen Spektralbereich und in hohem Maße dem verwendeten SWIR Kanal zuzuschreiben. Ein Vergleich der beiden Abbildungen (TM linke Bildhälfte) macht den Informationsgewinn deutlich, der besonders hoch eingestuft werden muß, da es sich bei der vorliegenden Thematic Mapper Aufnahme um eine Januar Aufzeichnung mit niedriger Sonnenelevation handelt, die für eine Verarbeitung bzw. Auswertung spektraler Inhalte weit weniger geeignet ist als ein vergleichbarer Datensatz mit hohem Sonnenstand.



Abb. 64: Farbkomposite der TM Kanäle 1, 4, 7, (kodierte blau, grün, rot) aus dem Bereich El Graara. Die Anhebung der Sättigung wurde berechnet nach dem in Abb. 32, 34, und 35 dargestellten Schema. Die Vielzahl auftretender Farbfrequenzen ist auf das sehr unterschiedliche Spektralverhalten insbesondere magmatischer Gesteine, im kurzwelligen Infrarot (SWIR) zurückzuführen. (Bodechtel & Kaufmann, 1985).

Tabelle 12 zeigt die Korrelationsmatrizen zweier identischer Szenen mit vergleichbarem Sonnenstand (Abb. 59a+b) von TM und MSS. Durch niedrige Korrelationen stark abgesetzt sind die SWIR-Bänder zu den restlichen Kanälen. In der sehr hohen Korrelation (0.966) der SWIR-Bänder zueinander drückt sich das sehr ähnliche Spektralverhalten der meisten einbezogenen Gesteinsoberflächen aus (Abb. 60). Dieser Umstand begünstigt jedoch den diagnostischen Ansatz für die Erfassung von Tonmineralen und Vegetationsflächen. Eine Datenkombination, der am niedrigsten korrelierten Kanäle

(1,4,7) zeigt die stärksten (nicht die häufigsten) spektralen Variationen, bezogen auf den gesamten berechneten Ausschnitt. Die Variation der Farbfrequenzen sind durch die gesteinspezifischen Reflexionskurven bestimmt. Auswahl und Kombination der Kanäle müssen je nach Anwendungsbereich und Aufgabenstellung definiert werden (z.B. Abb. 60). Für die Erfassung diagnostischer Spektralsignaturen ( $\text{Fe}^{2+3+}$ , Tonminerale, Vegetation) behält zumindest die Auswahl der Kanäle für beliebige Oberflächenbereiche ihre Gültigkeit. Zur reinen, möglichst detaillierten, photogeologischen Differenzierung müssen für unterschiedliche Regionen jeweils neue Konzeptionen zur Auswahl, Kombination und Verarbeitung der Kanäle erarbeitet werden, da die Farbe bzw. spektrale Signatur eines Gesteins oder seiner Oberfläche nur in Ausnahmefällen als charakteristisches Kriterium gesehen werden darf.

| MSS-Band | 4     | 5     | 6     | 7     |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 4        | 1.000 | 0.890 | 0.829 | 0.797 |
| 5        |       | 1.000 | 0.954 | 0.936 |
| 6        |       |       | 1.000 | 0.958 |
| 7        |       |       |       | 1.000 |

| TM-Band | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 7     |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1       | 1.000 | 0.889 | 0.856 | 0.803 | 0.719 | 0.710 |
| 2       |       | 1.000 | 0.914 | 0.875 | 0.803 | 0.794 |
| 3       |       |       | 1.000 | 0.968 | 0.842 | 0.829 |
| 4       |       |       |       | 1.000 | 0.840 | 0.827 |
| 5       |       |       |       |       | 1.000 | 0.966 |
| 7       |       |       |       |       |       | 1.000 |

Tab. 12: Korrelationsmatrizen identischer Szenen, unterschiedlicher Sensoren mit vergleichbarem Sonnenstand (Abb. 59a+b).

Der Vergleich der Korrelationsmatrizen von TM und MSS für die sichtbaren und NIR-Kanäle ergibt eine höhere Korrelation bei TM. Berechnungen für andere aride Gebiete (Jordanien, Saudi-Arabien) führten zu vergleichbaren Ergebnissen. Qualitative Vergleiche von Falschfarbenbildern (TM 2,3,4/MSS 4,5,7) ergaben erwartungsgemäß eine schlechtere spektrale Differenzierung von Gesteinsoberflächen bei TM. Die Ursache ist im wesentlichen in der geringeren Bandbreite der TM-Kanäle begründet. Die

Breitbandigkeit der MSS-Kanäle, mit entsprechenden Überlappungsbereichen vergleichbar den für das Farbpfinden verantwortlichen Sehzellentypen (Zapfen), gewährleistet eine differenziertere Aufzeichnung und Wiedergabe auch der Mischungsverhältnisse zweier benachbarter Grundfarben als die schmalbandigen Kanäle von TM. Dagegen treten Objekte, die relativ schmalbandige Reflexionsmaxima bzw. -minima im Zentrum der TM-Kanäle aufweisen, durch kräftigere Grundfarben (R,G,B) hervor. Die TM-Kanäle sind besonders im VIS Bereich für die Erfassung von Vegetationsflächen optimiert, wogegen eine spektrale Differenzierung von Gesteinsoberflächen aufgrund ihrer weitgespannten, schwachen Reflexions- bzw. Absorptionsbanden eingeschränkt ist.

### 1.2. Modular Optoelectronic Multispektral Scanner (MOMS)

MOMS kam bisher auf zwei Shuttlemissionen der NASA (STS-7, STS-11) zum Einsatz. Aufgrund der niedrigen Bahninklination von  $28.5^\circ$  konnten keine Aufzeichnungen vom marokkanischen Testgebiet gemacht werden. Erste Ergebnisse wurden u.a. vorgestellt von Bodechtel (1983), Kaufmann et al. (1984a), Meißner et al. (1983).

Die folgenden Aufnahmen zeigen den Ausschnitt einer Szene an der Grenze Chile/Bolivien, Typlokalität Salar de Coipasa. Sie sind geometrisch und radiometrisch nicht korrigiert.

Abb. 65a+b zeigen den gleichen Geländeausschnitt aufgezeichnet von MOMS Band 1 ( $0.575\text{--}0.625\mu\text{m}$ ) und LANDSAT-MSS Band 5 ( $0.6\text{--}0.7\mu\text{m}$ ). Die Gegenüberstellung veranschaulicht eindrucksvoll die höhere Bodenauflösung von MOMS ( $20\text{m}$ ) im Vergleich zu MSS ( $80\text{m}$ ). Feinere Strukturen wie Wasserläufe (1), Erosionskanäle (2) und die Säume zwischen Salzmarschen und anstehendem Gestein (3), erscheinen bei  $80\text{m}$  Auflösung völlig verwaschen, während sie im  $20\text{m}$  Signal sehr detailliert abgebildet werden. Ebenso werden kleinflächige Elemente, wie z.B. erodierte Lavaströme und Auswürflinge (4), bei MSS durch Mischsignaturen vergrößert oder kaum wahrnehmbar abgebildet.

Die breiten Pfeile zeigen bei MSS die Abtastrichtung mit ausgeprägter Streifenbildung, bei MOMS feine rechtwinklig angeordnete Streifen, ein sogenanntes Textilmuster. Es resultiert aus der zeilenweisen Abtastung (wie bei MSS/TM) und den Kalibrationsunterschieden der 6912 Detektoren (Kap.I.2.). Zur Korrektur dieser Fehler werden derzeit Programme entwickelt.

Ein Vergleich der geometrischen Abbildungsqualität beider Daten mit verfügbaren topographischen Karten ergab für MOMS um Faktor 10 geringere Abweichungen. Die Begründung hierfür ist in der simultanen Aufzeichnung aller 6912 Detektoren, in der Stabilität der Plattform (Shuttle) und in der niedrigen Orbitinklination ( $28.5^\circ$ ) zu finden. Durch letzte wirkt sich der Einfluß der Erdrotation auf den Abtastvorgang geringer aus. Aufgrund der unterschiedlichen Bahncharakteristiken und Aufnahmezeitpunkte läßt sich noch einmal der Einfluß des Sonnenstandes anschaulich demonstrieren. Bei vergleichbarer Sonnen-

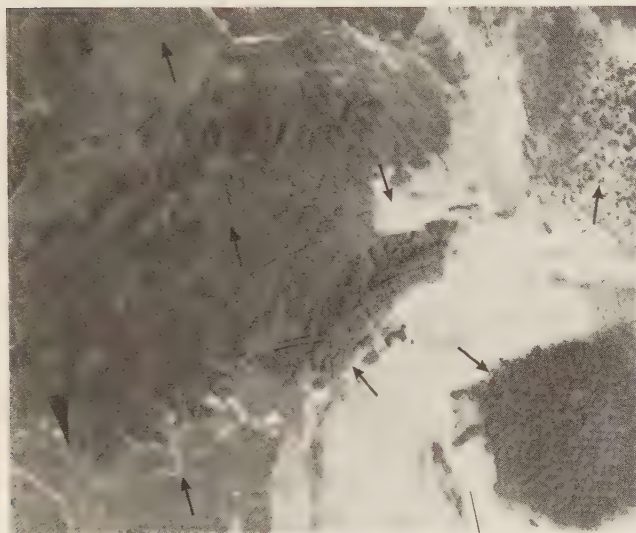


Abb. 65a: MSS-Kanal 5. Typlokalität Salar de Coipasa an der Grenze Chile/Bolivien. Bodenauflösung  $80 \times 80 \text{m}^2$  (Kaufmann et al. 1984a)



Abb. 65b: MOMS Band 1. Bodenauflösung  $20 \times 20 \text{m}^2$  (Kaufmann et al. 1984a)

elevation bewirkt der unterschiedliche Azimut (MOMS 320°, MSS 97°), insbesondere in Bereichen mit starkem Relief ein z.T. völlig verändertes morphologisches Erscheinungsbild (z.B. die Gipfelregion des Stratovulkans im rechten unteren Bildteil).

Wie bereits angemerkt, stellen die beiden Spektralbereiche von MOMS keine wesentliche Neuerung zu bereits existierenden Systemen dar. Sie können zur Differenzierung  $\text{Fe}^{2+3+}$  haltiger Gesteine und zur Erfassung von Vegetationsflächen genutzt werden. Ein Vergleich der Korrelationsmatrizen von MSS und MOMS ergab ähnliche Werte für vergleichbare Kanäle.

Abb. 66 zeigt ein Ratio der beiden MOMS-Kanäle (900/600nm). Die noch sichtbaren Reliefstrukturen sind auf eine Defokussierung des Infrarotkanals während der ersten Mission zurückzuführen. Sehr hell erscheinen dichte Vegetationsflächen (hohe Reflexion im 900nm, Absorption im 600nm Bereich). Die niedrigsten Grauwerte zeigen der intramontane Salzsee, anstehende andesitische und rhyolithische Gesteine in den Gipfelregionen aufgereihter Stratovulkane (Bild rechts) bzw. eines Aschenkegels (Bild mitte links) sowie schneebedeckte Regionen. Mittlere Grautöne signalisieren spärliche Buschvegetation, die einen Bereich von 3500-5000m einnimmt. Die zunehmende Höhe der Vulkane nach Westen (5090-5500m) ist an der Verteilung der Vegetation abzulesen.

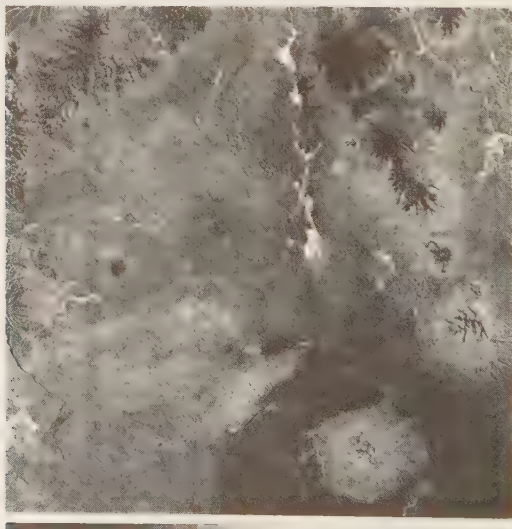


Abb. 66: Ratio berechnet aus den MOMS-Kanälen (900/600nm)

Abschließend soll an diesem Beispiel die Möglichkeit der Farbdarstellung zweikanaliger Daten demonstriert werden. Um den Anforderungen eines Interpreten gerecht zu werden, wurde von folgenden Überlegungen ausgegangen:

Es sollten sowohl der Tonwertumfang im Bereich des Salzsees als auch der, in den gering reflektierenden Regionen ohne Informationsverlust umgesetzt werden.

Die auftretenden Oberflächenphänomene sollten, soweit möglich, in den, für den Photointerpreten gewohnten Farben dargestellt werden (Vegetation= rot, Schnee= weiß).

Die spektralen Charakteristiken des Ratios (Abb.66) sollten als Farbinformation Verwendung finden.

Es sollte ein Algorithmus gewählt werden, der nicht nur eine gute Trennung einzelner Phänomene, sondern auch eine Koordination der dargestellten Farbe mit der entsprechenden Oberfläche erlaubt.

|             |     |    |   |                |   |    |             |
|-------------|-----|----|---|----------------|---|----|-------------|
| 600nm       | --) | I. | ( |                | ) | .B | Farb-       |
|             |     |    | ( | Transformation | ) |    | --) monitor |
| 900nm/600nm | --) | H  | ( |                | ) | .G |             |
|             |     |    | ( | R G B          | ) |    | --) Film-   |
| 900nm/600nm | --) | S. | ( |                | ) | .R | ausgabe     |

Abb. 67: Transformation nach RGB einer zweikanaligen Information. I = MOMS 600nm, H und S = MOMS 900/600nm (Haydn et al., 1982a), (Meißner et al., 1983)

Abb. 67 zeigt die gewählte Datenkombination und die Kodierung nach I,H,S. Der sichtbare Kanal (600nm) wird als Intensität verwendet. Er bringt die nötigen Albedovariationen und Texturinformationen. Das Ratio 900/600nm (Infrarot über Sichtbar) wird als Farbfrequenz- und Sättigungskomponente eingebracht. Um eine, für die Farbkodierung günstigere Grautonverteilung zu erhalten, wurden die Rohdaten logarithmisch transformiert.

Im Farbkomposite (Abb.68) variiert die Farbe (Frequenz und Sättigung) von gesättigtem Rot (hohe Ratiowerte) über mittel gesättigtes Grün nach schwach gesättigtem Blau (niedrige Ratiowerte). Die Helligkeit des Salzsees und der schneebedeckten Flächen werden durch fehlende Sättigung, die Intensitätskomponente und Schnittstellen im Histogramm kontrolliert.

Dichte Vegetation erscheint in gesättigtem Rot; die Buschvegetation in mittelgesättigten gelbbraunen bis rötlichen Farben. Salzmarschen zeichnen sich durch grünliche Nuancierungen aus, anstehende Gesteine in den Bereichen über 5000m Höhe zeigen schwach gesättigte blaue Farben. Gleiche Farben sind bedingt durch gleiches Spektralverhalten der entsprechenden Oberflächen in den beiden MOMS-Kanälen. Bei genauer Kenntnis der Verarbeitung ist neben der optimierten photogeologischen Differenzierung auch eine Aussage zum relativen Reflexionsverhalten in den beiden Ausgangskanälen möglich.

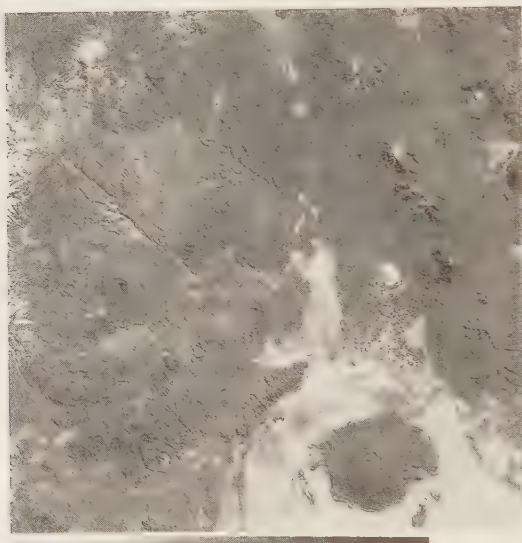


Abb. 68: MOMS Farbkomposite berechnet aus zwei Spektralkanälen unter Verwendung von Ratio und IHS Transformationen (Kaufmann, 1984)

Für zukünftige MOMS Missionen ist ein SWIR-Modul und ein Stereo-Modul in Entwicklung. Weitere Kanäle im sichtbaren und SWIR Bereich stehen zur Diskussion. Um die Parameter für zukünftige MOMS-Sensoren in bezug auf unterschiedliche Aufgabenstellungen zu optimieren, werden derzeit im Rahmen einer "Announcement of Opportunity", vergleichende Untersuchungen mit Daten existierender Systeme durchgeführt.

### 3. Resume und zukünftige Sensoren

Die seit relativ kurzer Zeit verfügbaren Daten von Thematic Mapper und MOMS bringen wesentliche Fortschritte für den geologisch orientierten Anwendungsbereich. Die höhere Bodenauflösung von 20m bzw. 30m bringt Verbesserungen insbesondere für folgende Zielbereiche.

- Kartierung feiner Strukturen und geringmächtiger Gänge
- Abgrenzung derselben von anthropogenen Objekten

- Erfassung von Versatzbeträgen an Störungen
- Ansprache von Oberflächen geringeren Ausmaßes durch reduzierte Mischsignaturbildung
- Kartiergenauigkeit

Neben den bisherigen Differenzierungsmöglichkeiten im VIS- und NIR- Bereich, auf der Basis variierender  $\text{Fe}^{3+}$  -Gehalte und Vegetationsanteile, eröffnen die neu erschlossenen Kanäle des TM eine Reihe zusätzlicher Anwendungsbereiche.

- bessere Trennung unterschiedlicher Gesteinskörper, insbesondere magmatischer Einheiten, durch Kombinationen mit dem SWIR Bereich
- deutlichere Hervorhebung und Abgrenzung versiegelter Flächen durch Einbeziehung des blauen Spektralbereiches
- diagnostische Ansatzmöglichkeiten für Tonminerale durch Verwendung beider SWIR-Kanäle, unabhängig vom  $\text{Fe}^{3+}$  Gehalt
- simultane Auswertbarkeit eines Thermalkanals zur Erfassung von Temperaturunterschieden; zur Trennung von Gesteinen mit unterschiedlichem  $\text{SiO}_2$ - Gehalt; zur Abgrenzung von Dolomit und Kalksteinen

Die neuen, im optischen (und thermalen) Bereich arbeitenden passiven Sensoren stellen zweifelsfrei Meilensteine in der Entwicklung der Fernerkundung dar. Dennoch blieben zwei wesentliche Forderungen der Nutzergemeinschaft bislang unerfüllt.

- der Wunsch nach digital stereoskopisch aufgezeichneten Daten
- das Verlangen nach Daten mit mehr diagnostischer Information

Stereoskopisch auswertbare, digital aufgezeichnete Daten werden mittelfristig von zwei Systemen zur Verfügung stehen. Einmal vom HRV Instrument des französischen SPOT Satelliten und zum anderen von MOMS, dessen Stereomodul derzeit gebaut wird. Beide Systeme arbeiten nach dem "push-broom" Prinzip, verwenden jedoch unterschiedliche Techniken zur Datenakquisition. Die Vor- und Nachteile beider Techniken sind ausführlich diskutiert in der Stereostudie von MOMS.

Die entscheidenden Vorteile bei Einbeziehung der 3. Dimension liegen in der sichereren Ansprache von Strukturelementen (keine ausschließliche Abschätzung über das Kriterium des Sonnenstandes), und in der Quantifizierung derselben, wodurch letztlich eine Objektivierung überregionaler Zusammenhänge erreicht werden kann.

Dem Verlangen nach mehr diagnostischer Information wurde durch die Entwicklung spezieller IR-Detektoren für den SWIR-Bereich erstmals Rechnung getragen. Dennoch bleibt ihr Anwendungsbe- reich (bei TM) stark limitiert.

Eine direkte Identifikation von Oberflächenmaterialien kann nur über schmalbandige und gleichzeitig vielkanalige Aufzeich- nungen erreicht werden. Durch die Erfassung schmälster Absorp- tionsbanden bei Aufzeichnung einer kontinuierlichen Spektral- signatur für jeden Bildpunkt, kann auch der allgegenwärtig störende Einfluß der  $\text{Fe}^{3+}$ -Gruppe unterlaufen werden.

Aufbauend auf erste Ansätze mit flugzeuggetragenen Systemen im optischen und thermalen Bereich sowie einer Weiterentwicklung der IR-Detektoren wird die NASA ca. 1988 erstmals einen 128 Kanal "push-broom" Scanner für den Wellenlängenbereich von  $0.4\text{--}2.5\mu\text{m}$  im Weltraum einsetzen.

Die unter dem Akronym SISEX (Shuttle Imaging Spektrometer Experiment) geführte Mission liefert Daten mit einer Bodenauf- lösung von  $30\text{m}$  bei einer spektralen Auflösung von  $0.01\mu\text{m}$  im sichtbaren und NIR Bereich bzw. von  $0.02\mu\text{m}$  im SWIR Bereich. Dieser Sensor, diskutiert als eines der möglichen Nachfolge- systeme von TM, bietet sicher weit mehr diagnostische Ansatz- möglichkeiten als bisherige Systeme.

Konzepte zur Auswahl anwendungsrelevanter Kanäle und deren Verarbeitung werden sich im wesentlichen an spektroskopischen Laboraten z.B. Hunt und Salisbury in Carmichael (1981) orien- tieren. Photogeologische Interpretationen nach herkömmlichen "Maßstäben" werden dabei etwas in den Hintergrund treten.

## VII. ABKÜRZUNGEN

---

### Abkürzungen

|            |                                              |
|------------|----------------------------------------------|
| ESA        | European Space Agency                        |
| LANDSAT    | Land Observation Satellite                   |
| MSS        | Multi-Spectral-Scanner                       |
| TM         | Thematic Mapper                              |
| HCMM       | Heat Capacity Mapping Mission                |
| HCMR       | Heat Capacity Mapping Radiometer             |
| MOMS       | Modular Optoelectronic Multispectral Scanner |
| SPOT       | Système Probatoire d'Observation de la Terre |
| CCD        | Charged Coupled Device                       |
| STS-7/11   | Space Transport System (Shuttle) Flug 7/11   |
| HDDT       | High Density Digital Tape                    |
| CCT        | Computer Compatible Tape                     |
| IFOV       | Instantaneous Field-Of-View                  |
| HOM        | Hotine Oblique Mercator                      |
| SOM        | Space Oblique Mercator                       |
| VIS        | Visible                                      |
| NIR        | Near Infrared (reflective)                   |
| SWIR       | Shortwave Infrared (reflective)              |
| TIR        | Thermal Infrared (emissive)                  |
| MTF        | Modulation Transfer Funktion                 |
| $\delta$   | Dichte                                       |
| $\Delta T$ | Temperaturdifferenz                          |
| P          | Thermale Trägheit                            |
| ATI        | Apparent Thermal Inertia                     |
| °K         | Temperatur in Grad Kelvin                    |
| el         | Sun Elevation                                |
| az         | Sun Azimut                                   |

# VIII. LITERATURVERZEICHNIS

Anding, D., Kauth, R., Turner, R., 1971, Atmospheric Effects on Infrared Multispektral Sensing of Sea-Surface Temperature from Space. Rpt. No. NASA CR-1858 Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

American Society of Photogrammetry, 1960, Manual of Photographic Interpretation. George Banta Company, Menasha, Wisconsin.

Bähr, H.P., 1978 Geometrical Analysis and Rectification of Landsat MSS Imagery; Comparison of Different Methods. Nachr. a. d. Karten und Vermessungswesen, R II, Nr. 36, Com. III, ISP, Moscow, USSR, 25-46.

Barret, E.C., Curtis, L.F., 1978, Introduction to Environmental Remote Sensing. Chapman and Hall, London, 263 pp.

Bartels, I., Angenheister, G., 1969, Geophysik. Fischer Bücherei, Frankfurt (Main), 267-274.

Blodget, H.W., Gunther, F.J., Podwysocki, M.H., 1978, Discrimination of Rock Classes and Alteration Products in Southwestern Saudi Arabia with Computer Enhanced Landsat Data. U.S. NASA Technical Paper.

Bodechtel, J., 1983, The Modular Optoelektronik Multispektral Scanner - MOMS - on STS-7. Proc of ESA-EARSeL Symp. ESA SP-188, Bruxelles, Belg.

Bodechtel, J., Nithack, J., 1974, Geologisch-tektonische Auswertung von ERTS-1 und SKYLAB Aufnahmen von Nord und Mittelitalien. Geoforum, 20, 11-24.

Bodechtel, J., Hofmann, O., Kunkel, B., Meißner, D., 1981, The modular optoelectronic multispectral scanner system for spaceborne remote sensing. Acta Astronautica, Vol.8, No. 7, Munich, 767-773.

Bodechtel, J., Kaufmann, H., 1985, Future MOMS Developments - Discussion of Improvements and Possibilities to be Expected for Geologic Applications. Proc. of ESA-EARSeL Symp., ESA SP-233, Strasbourg, France.

Bothorel, A., 1983, Teledetection des Ressources Terrestres: Signatures Spectrales (VIS, Proche I.R.) de Roches et de Minerais en Zone Aride, Application a trois Types de Mineralisations au Maroc. Mem. des Sciences de la Terre, C.N.R.S., No. 83-11, Paris, 145 pp.

Buchanan, M.D., 1979, Effective Utilization of Color in Multidimensional Data Presentation. Proc. of the Society of Photo-Optical Engineers, 199, 9-19.

Buggisch, W. Marzela, C., HÜgel, P., 1979, Die fazielle und paläogeographische Entwicklung der infrakambrischen bis ordovizischen Sedimente im Mittleren Anti-Atlas um Agdz (Marokko). Geol. Rundschau, H. 1, Stuttgart, 195-224.

# VIII. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Burger, H., 1981, Untersuchungen zur Klassifizierung von Gesteinsoberflächen auf Landsat-Aufnahmen mit Hilfe von Signatur- und Texturparametern. Berliner Geowiss. Abhandlungen, RA, D188, Berlin, 102 pp.
- Carle, C., 1982, Satellite Mapping, Geometric Correction of Remote Sensing Images. Danmarks Tekniske Højskole, Meddelelse No 12, Denmark, 128 pp.
- Carmichael, R. S., (ed), 1981, Handbook of Physical Properties of Rocks. Vol.I, CRC-Press, Florida, 327 pp.
- Chandrasekhar, S., 1960, Radiative Transfer. Dover, New York
- Chavez, P. S., Jr, 1975, Atmospheric, Solar, and MTF Corrections for ERTS Digital Imagery. American Society of Photogrammetry, Proceedings of Phoenix meeting, Falls Church, VA, 69-69 a, 14 pp.
- Chavez, P.S., Jr. Berlin, G.L., Acosta, A.V., 1977, Computer Processing of Landsat MSS Digital Data for Linear Enhancement. Mapping with Remote Sensing Data, Proc. of the Sec. An. Pecora Mem. Symp., Sioux Falls, South Dakota, 235-250.
- Choubert, G., 1952, Geologie du Maroc, Histoire geologique du domaine de l'Anti-Atlas. Notes et Mem. Serv. geol. Maroc, No 100, Casablanca 77-194.
- Choubert, G., 1952 a, Precambrien III et le Georgien de l'Anti-Atlas. Introduction stratigraphique, Contribution a l'etude du Cambrien inferieur et du Prekambrien III de l'Anti-Atlas Marocain. Notes et Mem. Serv. geol. Maroc, No. 103, Rabat, 17-39.
- Choubert, G., 1958, L'Adoudounien et le Precambrien III dans l'Anti-Atlas. Coll.int. C.N.R.S., No.76, Paris, 143-162.
- Choubert, G., 1963, Histoire geologique du Precambrien de l'Anti-Atlas. Notes et Mem. Serv. geol. Maroc, No. 162, Rabat, 352 pp.
- Colvocoresses, A.P., 1974, Space Oblique Mercator. Photogram. Eng., v. 40, N. 8, 921-926.
- Colwell, R.N., (ed.), 1983, Manual of Remote Sensing, (Vol.I +II), American Society of Photogrammetry, Falls Church, Va., 2440 pp.
- Destombes, I., 1962, Stratigraphie et paleogeographie de l'Ordovicien de l'Anti-Atlas Maroc. Essai de synthese, Bull. Soc. Geol. Fr., No. 4, Paris, 453-460.
- Destombes, I., 1963, Donnees stratigraphiques sur l'Ordovicien de l'Anti-Atlas Maroc. R. Inst. franc. petrol., No. 18, Paris, 1464-14

# VIII. LITERATURVERZEICHNIS

---

- Destombes, I., 1970, Cambrien moyen et Ordovicien. Coll. int. sur le corrélat. du Prékambrien, Notes et Mem. Serv. Géol. Maroc, No. 229, Rabat, 161-170.
- European Space Agency, Earthnet Programme, 1979, Format Specifications for Landsat MSS System Corrected Computer Compatible Tapes produced at Fucino. Italy, EPO/80-685/SB/gg, 37 pp.
- European Space Agency, Earthnet Programme, 1984, the Landsat Programme (MSS and TM). Compiled Handout by L. Fusco, Frascati, Italy, Spot Seminar DFVLR 15. - 16. Okt.
- Finsterwalder, R., Hofmann, W., 1968, Photogrammetrie. Verlag Walter de Gruyter & Co, Berlin, 455 pp.
- Gerthsen, C., Kneser, O. H., Vogel, H., 1977, Physik. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 768 pp.
- Gierloff-Emden, H.G., 1984, MOMS, Interpretation and Evaluation of the MOMS-Image Arica, West Coast of South America, EARSel/ESA -Symp. Guildford, UK, 169-177.
- Gierloff-Emden, H.G., Schroeder-Lanz, H., 1970, Luftbilddauswertung. B-I, II, III, Bibliographisches Institut, Mannheim, Wien, Zürich.
- Gierloff-Emden, H.G., Wieneke, F., (ed), 1978, Anwendung von Satelliten- und Luftbildern zur Geländedarstellung in topographischen Karten und zur bodengeographischen Kartierung. Münchner Geograph. Abhandl. Band 20, 69 pp.
- Gillespie, A.R., 1976, Directional Fabrics Introduced by Digital Filtering of Images. Proc. of the Sec. Int. Conf. on Basement Tektonics, Newark, Delaware, 500-507.
- Goetz, F.H.A., Billingsley, F.C., Gillespie, A.R., Abrams, M.J., Squires, R.L., Shoemaker, E.N., Lucchitta, Ivo, Elston, D.P., 1975, Applications of ERTS Images and Image Processing to Regional Geologic Problems and Geologic Mapping in Northern Arizona. JPL Technical Report 32-1597, 188 pp.
- Goetz, F.H.A., Rowan, L.C., 1981, Geologic Remote Sensing. Science, USA. Vol. 211, 781-791.
- Gossmann, H., 1980, Der Einfluß topographischer Strukturen auf die nächtlichen Oberflächentemperaturen: Auswertung einer Satelliten-Thermalaufnahme der Oberrheinebene und ihrer Randgebirge. Tellus-Newsletter, B.17, Ispra, Italy.
- Haydn, R., Dahlke, G.W., Henkel, J., Kaufmann, H., 1982, a, Multidisciplinary Investigations on HCMM-Data over Middle Europe and Morocco. NASA-HCMM type III Final Report, Contr.No. HCM-053, 82 pp.

# VIII. LITERATURVERZEICHNIS

- Haydn, R., Dahlke, G.W., Henkel, J. and Bare, J.P., 1982,b, Application of IHS Color Transform for Processing of Multispectral Data and Image Enhancement. Int. Symp. on Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands, Cairo, Egypt, 19.-25. Jan., Vol. 1, 599-616.
- Haydn, R., Youssef, M., 1982,c, The Application of Processed Landsat Imagery in Photo-Interpretation. IGARSS-Symp., München, 1.-4. Juni, Vol. 2, TP-9, 5.1-5.8.
- Haydn, R., 1982, Some Aspects of the Presentation of Remote Sensing Data, EARSeL/ESA-Symp., ESA-SP 175, Igls, Austria, 77-80.
- Haydn, R., 1983, A Concept for the Processing and Display of Thematic Mapper Data. Proc. of the LANDSAT-4 Science Characterization, NASA Publ. 2355, GSFC, Greenbelt, MA.
- Jaskolla, F., 1978, Geologisch-Tektonische Untersuchungen an Satellitenbildlineamenten in den Nördlichen Kalkalpen. Diss. Univ. München, 188 pp.
- Jaskolla, F., Kaufmann, H., 1984, The Applicability of Improved Remote Sensing Data for Lithological and Structural Mapping. IGARSS-ESA-SYMP., Strasbourg, 27. - 30. August, ESA-SP 215, 265-271.
- Kahle, A. B., Rowan, L.C., Madura, D.P., 1979, Rock and Mineral Discrimination Using Mid-IR Spectral Emittance Data Combined with Visible and Near-IR Spectral Reflectance Data. 13. Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Michigan, USA, Vol. I, 75 - 76.
- Kahle, A. B., Schioldge, J. P., Abrams, M. J., Alley, R. E., Le Vine, C. J., 1981, Geologic Application of Thermal Inertia Imaging Using HCMM Data. Jet Propulsion Laboratory Publ. 81-55, Pasadena, California, 199 pp.
- Kahle, A.B., 1982,a, Spectral Remote Sensing of Rocks in Arid Lands. Int. Symp. on Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands, Cairo, Egypt, 19. - 25. Jan., Vol.1, 279-291.
- Kahle, A.B., 1982, b, The Use of Thermal Infrared Images in Geologic Mapping. IGARSS-Symp., München, 1.-4. Juni, Vol. 1, WA-3, 3.1-3.5.
- Kaufmann, H., Jaskolla, F., 1983, Remote Sensing for Geology. Alpach Summer School 27. July - 5. August, ESA SP-205 151-157.
- Kaufmann, H., 1984, A Multiple Approach in Remote Sensing for Structural and Lithological Mapping by Use of MOMS/LANDSAT/HCMM-Data. EARSeL-ESA-Symp., Guildford, UK, 337-347.

# VIII. LITERATURVERZEICHNIS

- Kaufmann, H., Bodechtel, J., Haydn, R., 1984, a, Spectral Significance of MOMS versus LANDSAT-Data and Future Aspects. IGARSS-ESA-Symp., Strasbourg, 27.-30. August, ESA-SP 215, Vol. 1, 39-45.
- Kaufmann, H., Henkel, J., Haydn, R., Köch, B., 1984, b, Forest Damage Assessment via Advanced Image Processing Techniques, Bases on TM-Compatible Air-Borne Scanner-Data. 18. Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Paris, France, Vol. III, 1863-1872.
- Kauth, R.J., Thomas, G.S., 1976, The Tasselled Cap - A Graphic Description of the Spectral Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat. Proc. Symp. Machine Processing of Remotely Sensed Data, West Lafayette, Indiana, p. 4B-41-4B-53.
- Kneizys, F.X., Shettle, E. P., Gallery, W.O., Chetwynd, J. H., Abreu, L.W., Selby, J.E.A., Fenn, R.W., Mc Clatchey, R.A., 1980, Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 5. Rpt. AFGL-TR-80-0067 Air Force Geophysical Laboratory, Hanscom AFB, Maryland.
- Konecny, G., 1972, Geometrical Aspects of Remote Sensing. ISP, Com. III, Ottawa.
- Konecny, G., 1975, Grundlagen der Photographie. Symposium der Erderkundung der DFVLR und DGP, Köln-Porz, 25-45.
- Konecny, G., Lehmann, G., 1984, Photogrammetrie. 4. Aufl., de Gruyter Verl. Berlin New York, 392 pp.
- Konecny, G., Schuhr, W., 1975, Digitale Entzerrung der Daten von Zeilenabtastern. Bildm. und Luftbildw. Nr. 135-143
- Kronberg, P., 1984, Photogeologie. F. Enke Verlag Stuttgart, 268 pp.
- Küppers, H., 1980, Das Grundgesetz der Farbenlehre. Du Mont Verlag, Köln, 216 pp.
- Leblanc, M., 1973, Les Formations infracambrienne de Bou Azzer (Anti-Atlas Central Maroc), lithostratigraphie, tectonique et position structural. Notes et Mem. Serv. Geol. Maroc, No. 254, Rabat, 7-14.
- Leblanc, M. 1981, Ophiolites precambriennes et gites arsenies de Cobalt (Bou Azzer-Maroc). Notes et Mem. Serv. Geol., No. 280, Rabat, 306 pp.
- Lillesand, T. M., Kiefer R. W., 1979, Remote Sensing and Image Interpretation. I. Wiley and Sons, USA, 612 pp.
- List, F. K., 1969, Quantitative Erfassung von Kluftnetz und Entwässerungsnetz aus dem Luftbild. Bildmessung u. Luftbildwesen, 37, 4, Karlsruhe.

# VIII. LITERATURVERZEICHNIS

- Meißner, D., 1982, Modular Optoelectronic Multispectral Scanner (MOMS) Development. 20th Goddard Mem. Symp. and 4th Joint AAS/DGLR Symp, AAS-82-131, NASA GSFC.
- Meißner, D., Laucht, H., Bodechtel, J., Haydn, R., 1983, Modular Optoelectronic Multispectral Scanner (MOMS) for Earth Observation. First Results of STS-7 Mission. Joint International Geoscience and Remote Sensing Symp. IGARSS San Francisco, USA.
- Moik, G. I., 1980, Digital Processing of Remotely Sensed Images. NASA-SP-431, Washington, DC, 330 pp.
- MOMS-01; 1984, Announcement of Opportunity, BMFT/DFVLR/University of Munich.
- Munsel, 1975, Soil Color Charts. Macbeth a Division of Kollmorgen Corp. Baltimore, Maryland.
- Mutter, E., 1965, Kompendium der Photographie. B. II, Berlin
- Nagel, H.-H., (ed.), 1977, Image Processing. Springer, New York, 328 pp.
- NASA, 1976, Landsat Data Users Handbook. GSFC Document 765 DS-4258, Goddard Space Flight Center.
- NASA, 1980, Heat Capacity Mapping Mission. Users Guide, Goddard Space Flight Center Greenbelt, Maryland, 120 pp.
- O'Leary, D.W., Friedman, J.D., Pohn, H.A., 1976, Lineament, Linear, Lination: Some Proposed New Standards for Old Terms. Geol.Soc. America, Bull. 87, 1463-1469.
- Pratt, W. K., 1977, Digital Image Processing. John Wiley and Sons, New York.
- Pratt, D. A., Ellyett, C. D., 1978, Image Registration for Thermal Inertia Mapping, and its Potential Use for Mapping of Soil Moisture and Geology in Australia. 12. Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, USA, Vol. 2, 1207-1217.
- Price, J. C., 1979, Surface Temperature Variations as Measured by the Heat Capacity Mapping Mission. 13. Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan USA, Vol. 2, 765-770.
- Quiel, F., 1973, Zur Anwendung von Temperaturmessungen im Thermalen Infrarot in der Hydrologie. Diss. Univ. München, 108 pp.
- Raines, G.L., Offield, T.W., Santos, E.S., 1978, Remote Sensing and Subsurface Definition of Facies and Structure Related to Uranium Deposits, Powder River Basin, Wyoming. Economic Geology, v73, n8, 1706-1733.

# VIII. LITERATURVERZEICHNIS

- Roch, E., 1950, Histoire stratigraphique du Maroc. Notes et Mem. Serv. Geol. Maroc, No. 80, Toulouse.
- Roland, N.W., 1973, Die Anwendung der Photointerpretation zur Lösung stratigraphischer und tektonischer Probleme im Bereich von Bardai und Aozou (Tibestigebirge, Zentral-Sahara). Berl. Geograph. Abh., H. 19, 48pp.
- Rösch, H., 1968, Die Quantitative Röntgenographische Phasenanalyse - Ein Vergleich verschiedener Analysemethoden. Neues Jahrbuch Mineral., 108, Bd 3, Stuttgart, 271-291.
- Rosenfeld, A., Kak, A. C., 1976, Picture Processing by Computer. Academic Press, New York.
- Rowan, L.C., Kahle, A.B., 1982, Evaluation of 0.46 to 2.36µm Multispectral Scanner Images of the East Tintic Mining District, Utah, for Mapping Hydrothermally Altered Rocks. Economic Geology, v77, n8, 441-452.
- Sabins, F. F. Jr., 1978, Remote Sensing, Principles and Interpretation. W. H. Freeman and Co., San Francisco, CA., 426 pp.
- Short, N. M., Lowman, P. D. Jr., Freden, C. S., Finch, W. A., Jr., 1976, Mission to Earth: Landsat Views the World. NASA SP-360, Washington, DC, 459 pp.
- Short, N. M., 1982, The Landsat Tutorial Workbook. NASA SP-1078, Washington, DC, 553 pp.
- Short, N. M., Stuart, L. M., 1982, The Heat Capacity Mapping Mission Anthology. NASA SP-465, Washington, DC, 263 pp.
- Siegal, B. S., Gillespie, A. R., 1980, Remote Sensing in Geology. I. Wiley and Sons, USA, 702 pp.
- Stänz, K., 1978, Atmosphärische Korrekturen von Multispektraldaten des Erdkundungssatelliten Landsat 2. Juris Drucke und Verlag, Zürich, 127 pp.
- Sorensen, B. M., (ed.), 1979 International Workshop on Atmospheric Correction of Satellite Observation of Sea Water Colour. Ispra, Italy, 20.-22. March, 53 pp.
- Taylor, M.M., 1974, Principal Components Color Display of ERTS Imagery. NASA SP 351, B, Washington 1877-1897.
- United States, Department of Interior, Geological Survey, 1978, Characteristics of the Landsat Multispectral Data System. Sioux Falls, South Dakota, Open File Report 78 - 187, 76 pp.

# VIII. LITERATURVERZEICHNIS

---

- United States, Department of Interior, Geological Survey, 1978, Manual on Characteristics of Landsat Compatible Tapes produced by the EROS Data Center Digital Image Processing System. U.S. Government Printing Office, Washington DC, Stock Nb. 024-001-03116-7, 77 pp.
- Watson, K. 1979, Regional Thermal-Inertia Mapping to Discriminate Geologic Materials. 13.Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, USA, Vol.1, 77-78.
- Watson, K., Hummer-Miller, S., Offield, T., 1982, Geologic Thermal-Inertia Mapping Using HCMM Satellite Data.IGARSS -Symp., München, 1.-4. Juni, Vol. 1, WA-3, 2.1-2.6.
- Way, D., 1978, Terrain Analysis. Dowden Hutchinson and Ross Inc., Stroudsburg, Pennsylvania, 438 pp.
- Wise, D. U. 1977, Geologic Lineaments: Remotely Sensed Bonanzas and Extravaganzas. 11. Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, USA, Vol. 1, 179.

## IX. DANKSAGUNG

---

### Danksagung

Herr Prof. Dr. Johann Bodechtel, Leiter der Zentralstelle für Geophotogrammetrie und Fernerkundung regte die vorliegende Arbeit an. Mein Dank gilt ihm vor allem für sein lebhaftes Interesse und die zahlreich gebotenen Gelegenheiten, Erkenntnisse zur Fernerkundung auf vielen Ebenen erarbeiten, diskutieren und vertiefen zu können.

Herrn Dr. Rupert Haydn möchte ich für sein persönliches Engagement, die zahlreichen Hilfestellungen bei der Einarbeitung in die Methoden der Bildverarbeitung und die Betreuung im Rahmen des Forschungsvorhabens sehr herzlich danken.

Herrn Prof. Dr. H.-G. Gierloff-Emden darf ich für wertvolle Anregungen und kritische Diskussionen meinen besonderen Dank aussprechen.

Vielen Dank allen Mitarbeitern der ZGF, insbesondere den Herren L. Hauck, Dr. J. Henkel, Dr. J. Jaskolla, F. Lehmann, den Herren Dr. G. Dahlke und J. Mederer sowie meinem Studienkollegen Dr. J. Henkel für die Geländebegleitung.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich auch den Mitarbeitern des Fachlabors Dr. Frickhinger besonders Herrn H. Schäfer sowie Frau Sieber-Greb und Frau G. Ott für die Textverarbeitung aussprechen.

Zuletzt möchte ich mich für einen einmaligen Zuschuß der Fakultät und für die Finanzierung durch den Bundesminister für Forschung und Technologie im Rahmen eines Forschungsvorhabens vielmals bedanken.

## X. LEBENS LAUF

---

### Lebenslauf

Name: Hermann Josef Kaufmann

geb.: 29. März 1949 in München

Eltern: Hermann Kaufmann, Dipl.-Ing.  
Charlotte Kaufmann, geb. Denk

Schulbildung: 1955-1970 Grundschule und Math. Naturwissen-  
schaftliches Gymnasium in München

Studium: 1971-1974 Studium der Betriebswirtschaft an  
der Universität in München  
  
1974-1980 Studium der Geologie mit Diplomab-  
schluß an der Ludwig-Maximilians-Universität  
in München

berufliche  
Erfahrung: 1971-1980 Angestellter im öffentl. Dienst  
  
1980-1985 Wiss. Angestellter am Inst. für  
Allgemeine und Angewandte Geologie der Lud-  
wig-Maximilians-Universität München, unter  
Leitung von Prof. Dr. J. Bodechtel, im Rah-  
men des BMFT-Forschungsvorhabens "Entwick-  
lung anwendungsorientierter Methoden zur  
Auswertung von Satelliten Fernerkundungs-  
daten".  
  
Co-Investigator im Heat-Capacity-Mapping-  
Mission Programm der NASA "Multidisciplin-  
ary investigations on HCMM data over Middle  
Europe and Morocco".  
  
Gestaltung und Durchführung eines Workshops  
"Remote Sensing for Geology" für die Sommer-  
schule Alpbach, Austria, gefördert durch die  
ESA und die DFVLR.  
  
Mitbetreuung der Simulationskampagnen und  
Experimentalfüge von MOMS-01 auf Shuttle-  
flügen STS-7 und STS-11.  
  
Beteiligung an Studien zur Definition der  
Nutzeranforderungen an einen satellitenge-  
tragenen Stereo- bzw. SWIR-MOMS und an ei-  
nen Radarsensor.  
  
Seit 1985 Wiss. Angestellter d. Universität  
Karlsruhe im Rahmen des Sonderforschungsbe-  
reichs 108 unter Leitung von Prof. Dr. H.-P.  
Bähr und Prof. Dr. R. Stellrecht.  
  
Co-Investigator im MOMS-01 Programm zur Da-  
tenanalyse und Vergleich mit LANDSAT Thema-  
tic Mapper Daten unterstützt durch die NASA  
und gefördert durch das BMFT.



